

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN

SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN



PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO E INSTALACIÓN DE UNA RED FTTH

Autor:	JESÚS GALEANO CORCHERO
Directora:	KARINA GINÉ BARTOLOMÉ
Tutor:	MARCELINO LÁZARO TEJA

DICIEMBRE DE 2009

Proyecto Fin de Carrera
DISEÑO E INSTALACIÓN DE UNA RED FTTH

Autor
JESÚS GALEANO CORCHERO

Directora
KARINA GINÉ BARTOLOMÉ

Tutor
MARCELINO LÁZARO TEJA

La defensa del presente Proyecto Fin de Carrera se realizó el día 15 de Diciembre de 2009, siendo calificada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE: CARLOS GARCÍA RUBIO

SECRETARIO: MARIO DE PRADO CUMPLIDO

VOCAL: MANUEL A. VÁZQUEZ LÓPEZ

y habiendo obtenido la siguiente calificación:

CALIFICACIÓN:

Leganés, a 15 de DICIEMBRE de 2009

*A Rocío,
a quien no he podido dedicarle
todo el tiempo que hubiera deseado,*

y en especial a mi abuela Rosa...

Agradecimientos

Quiero agradecer de corazón a todos aquellos que han confiado en mí para que este proyecto sea hoy una realidad, en especial:

A Marce, por haber aceptado ayudarme y creer en mi proyecto desde el primer momento. Gracias por haber tenido la paciencia y dedicación suficiente para sacarlo adelante. Sin tu ayuda, no hubiera podido.

A Marisa Fernández, por haberme animado a emprender una iniciativa como ésta. A pesar de no haberselo agradecido en ese momento, aprovecho para reconocérselo ahora. Gracias a ti, empecé a ver la luz.

A Karina y Santiago, por haberme brindado la oportunidad de llevar a cabo el proyecto, y ayudarme cuando lo he necesitado. Los momentos decisivos han dependido en muchas ocasiones de vosotros y si vuestra dedicación no lo hubiera podido conseguir.

A mis padres y mi hermana, por haberme apoyado y ayudado día a día con el proyecto y sobre todo, con la carrera. Sé que ha sido difícil pero ha merecido la pena.

A todos mis amigos, en especial los que vosotros sabéis. Sois muchos para nombrar aquí, pero muchas gracias a todos por haberme apoyado, comprendido y ayudado en todos los momentos de mi vida. Sois mi segunda familia.

A mis tres compañeros de clase con los que he compartido toda la carrera, y sin los que no hubiera sido posible estar hoy aquí. Y también a aquellos que no pudieron terminarla y que abandonaron el barco.

A mis compañeros de trabajo, por haberme animado todos los días a sacar adelante este proyecto a pesar de haber pasado por días difíciles. Habéis sido un gran apoyo para mí.

Gracias a todos por haber participado en una parte de mi carrera tan importante. Todos habéis puesto vuestro grano de arena para poder salir adelante en los momentos difíciles. Gracias, un vez más.

Resumen

El presente Proyecto Fin de Carrera tiene como fin detallar de forma minuciosa, el diseño y la instalación una red óptica FTTH, para dar una cobertura de servicio a 700 usuarios en un barrio de la capital de Madrid.

El desarrollo del documento consta de varios capítulos que se detallan a continuación:

- Planteamiento y objetivos. Breve introducción en la que se exponen tanto la motivación del proyecto como los objetivos del mismo. Para ello se realiza una breve descripción de la situación actual en el último tramo de las redes (bucle de abonado) y se propone mejorar la red a partir de la inclusión de transmisión óptica hasta cada usuario final.
- Introducción a los sistemas FTTH. A lo largo de este capítulo se realiza una descripción detallada sobre este tipo de redes ópticas, analizando y desgranándola a todos los niveles: nivel físico, nivel de enlace y nivel de red. Con ello se pretende explicar y dar a conocer este tipo de redes que configuran la solución final del proyecto.
- Fundamentos de transmisión en fibra óptica. En este capítulo se tratan de forma minuciosa los fundamentos de transmisión a través de sistemas ópticos, en los que se basan las redes FTTH. Se realiza una exposición sobre la teoría física que permite la transmisión, y una descripción detallada de todos los elementos intervinientes en el proceso de comunicación basado en esta infraestructura física.
- Procedimiento y recomendaciones de diseño de una red FTTH. A la hora de realizar un diseño y una instalación de una red de este tipo, es necesario tener en cuenta los procedimientos para ello conforme a la normativa vigente. En este capítulo se desarrollan los más importantes y necesarios para poder diseñar e instalar una red óptica pasiva de forma óptima.
- Diseño e instalación de la red FTTH. Se realiza una breve descripción del proyecto donde se expone el escenario del despliegue de la red y la solución adoptada para tal fin. El capítulo se encuentra dividido en dos grandes bloques: la parte de diseño, donde se explican y analizan de forma detallada todos y cada uno de los pasos llevados a cabo en el diseño de la red; y la parte de planificación e instalación de la red, donde se detallan los pasos seguidos para la implantación y certificación final de la red.
- Conclusiones. Capítulo donde se extraen las consideraciones finales y las conclusiones una vez realizados el diseño y la instalación de la red, analizando el resultado final y destacando las particularidades más relevantes del proyecto.

Además, se adjuntan diversos apéndices que complementan la información de los distintos capítulos del proyecto, así como anexos con planos y fotografías que documentan gráficamente la instalación real llevada a cabo en el área de despliegue expuesta en el capítulo 5.

Índice General

Capítulo 1 Planteamiento y Objetivos	11
1.1. Motivación del proyecto	11
1.2. Objetivos.....	16
Capítulo 2 Introducción al Sistema FTTH.....	19
2.1. Introducción a las redes FTTx	19
2.2. Arquitectura general de una red FTTH	22
2.3. Funcionamiento genérico de una red PON	26
2.4. Ventajas e inconvenientes de las redes PON	36
2.5. Estándares de redes PON	39
2.6. Sistemas de transmisión basados en GPON	46
2.7. Servicios ofrecidos por la red FTTH	66
2.8. Situación actual de la tecnología FTTH y previsiones de futuro	69
Capítulo 3 Fundamentos de transmisión en fibra óptica.....	77
3.1. Introducción	77
3.2. Fundamentos físicos de transmisión por fibra: óptica geométrica	87
3.3. Transmisión de señales a través de fibra óptica	110
3.4. Parámetros de las fibras ópticas	124
3.5. Dispositivos emisores y receptores de la luz.....	129
3.6. Elementos de transmisión en sistemas de fibra óptica	134
Capítulo 4 Procedimiento y recomendaciones de diseño e instalación de una red FTTH.....	167
4.1. Diseño y planificación de una red FTTH	167
4.2. Instalación de una red FTTH	190
Capítulo 5 Diseño e Instalación de una red FTTH.....	203
5.1. Objeto y alcance del proyecto.....	203
5.2. Descripción del proyecto	204
5.3. Diseño del proyecto.....	207
5.4. Planificación del proyecto.....	254
5.5. Instalación del proyecto	259
Capítulo 6 Conclusiones.....	275
Apéndice 1 Estándares de la fibra óptica	281
Apéndice 2 Parámetros de las fibras ópticas	289
Apéndice 3 Dispositivos emisores y receptores de luz.....	315
Apéndice 4 Elementos de transmisión en sistemas de fibra óptica.....	327
Anexo I Planos del proyecto	367
Anexo II Reportaje fotográfico	373
Glosario de términos	411
Bibliografía.....	415

Capítulo 1

Planteamiento y Objetivos

El capítulo que se muestra a continuación, analiza de forma pormenorizada la situación actual de la tecnología instalada y en servicio en el último tramo de la red telefónica: el bucle de abonado. Partiendo de esta información, se desarrolla la motivación principal del proyecto, consistente en mejorar la tecnología del bucle de abonado.

El objetivo principal del proyecto consiste en conocer, describir, implementar y desplegar la tecnología FTTH en una zona determinada, consiguiendo homogeneizar la red bajo una misma tecnología física de acceso y permitiendo al usuario final disfrutar de servicios de ultra banda ancha.

1.1. Motivación del proyecto

Desde el invento del teléfono en 1876, por Alexander Graham Bell, hasta nuestros días, las redes de telecomunicaciones han evolucionado a lo largo de su historia para ofrecer servicios de telefonía, televisión e Internet en sus respectivas variantes.

La creciente demanda de servicios de comunicaciones desde la década de los 90, ha supuesto una verdadera revolución en el campo de las soluciones aportadas por los operadores para dar respuesta a este fenómeno. Dichas soluciones, pasan indistintamente por dos cauces necesarios:

- Incrementar la capacidad del canal disponible por el usuario, aumentando tanto la velocidad de transferencia de datos, como el volumen de información.
- Disminuir la tasa de errores del sistema, aumentando la fiabilidad y la calidad en las transmisiones.

El hecho de aumentar el ancho de banda y reducir la pérdida de información a lo largo de la transmisión, ha supuesto todo un reto a nivel de infraestructura física necesaria para la comunicación. Tradicionalmente, los operadores de comunicaciones han trasladado lo anterior a la práctica a dos niveles:

- A nivel de infraestructura troncal (*backbone* o *core*) del operador. La comunicación entre centrales telefónicas y nodos se ha renovado a lo largo de los últimos años, digitalizando la red.

- A nivel de infraestructura de bucle de abonado. La conexión local entre la central telefónica y el usuario ha sido objeto de importantes avances tecnológicos, permitiendo un aumento considerable del ancho de banda para el usuario final, y facilitando así el transporte tanto señales de voz como datos a través del mismo canal a gran velocidad.

Es por tanto el bucle de abonado el punto que mayor impacto tiene sobre el usuario final. De ahí que haya suscitado gran interés a los operadores, siendo objeto de importantes inversiones en nuestro país, y en el resto del mundo. Gracias a ello, se ha conseguido ofrecer gran cantidad y variedad de servicios multimedia: Internet de alta velocidad, videoconferencias, redes de interconexión, teletrabajo, transmisión de programas de televisión, etc.

En este último punto, la solución más común adoptada y comercializada en España ha sido la tecnología xDSL, (más concretamente, ADSL) capaz de aprovechar el cable de cobre instalado en hogares y empresas. Este grupo de tecnologías, multiplexan en un mismo medio tanto las señales de voz como los datos a diferentes frecuencias, permitiendo la transmisión simultánea de estos servicios en tres canales [1]:

- Canal descendente (*downstream*). Utiliza la banda de frecuencias más elevada para la transmisión. En el caso de ADSL se encuentra entre los 150 KHz y 1,1 MHz.
- Canal ascendente (*upstream*). Utiliza igualmente una banda de frecuencias elevada, aunque menor que el canal descendente. Para el caso del ADSL la banda se encuentra entre los 25 KHz y los 150 KHz.
- Canal de voz, ubicado en baja frecuencia, hasta los 4 KHz.

A continuación, se muestra un gráfico explicativo sobre el funcionamiento en frecuencia de la tecnología ADSL [1].

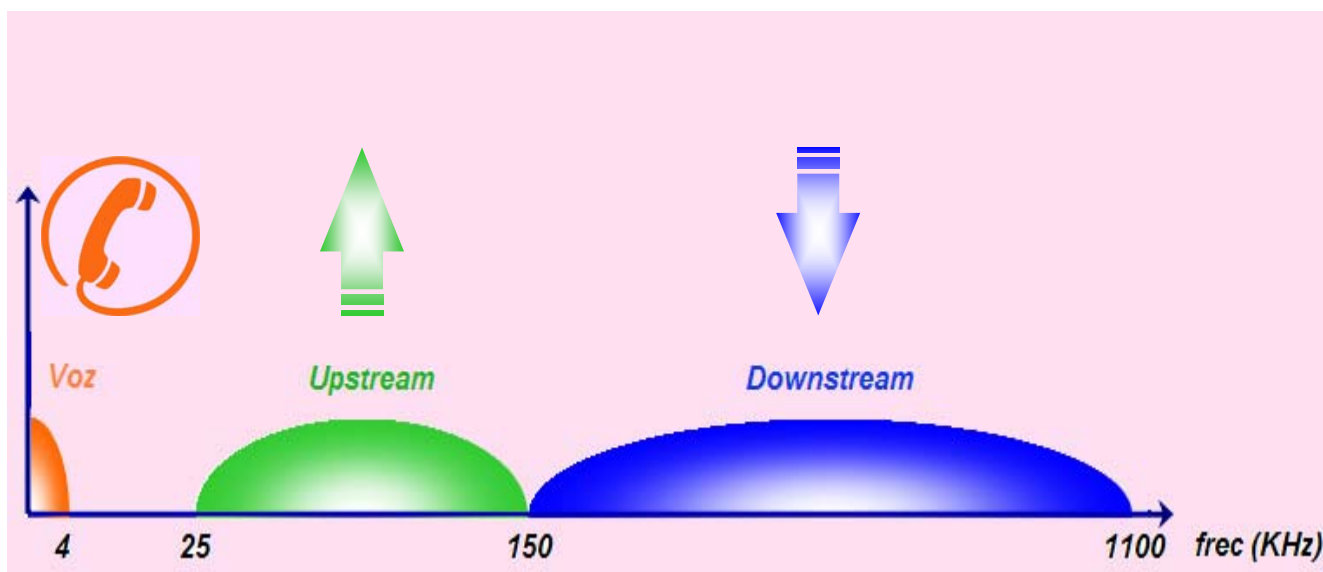


Figura 1: Bandas de frecuencia de canales de transmisión de ADSL

Tal y como se puede observar en la figura anterior, el ancho de banda a frecuencias altas es mayor que en las frecuencias bajas, pudiendo alcanzar tasas de velocidad mayores.

Sin embargo, existen importantes limitaciones en los sistemas xDSL que convierten al sistema en insuficiente en cuanto a ancho de banda se refiere. Las principales limitaciones de los sistemas xDSL, vienen determinadas tanto por la distancia de enlace del bucle de abonado, como por la velocidad de transmisión del sistema. A continuación se muestra una tabla de las diferentes tecnologías xDSL [2].

Tecnología	Velocidad máxima	Distancia máxima
ADSL/RADSL	☞ 256 Kbps a 8 Mbps hacia el abonado	☞ 5.4 Km para velocidades inferiores a 1.5 Mbps
	☞ 9.6 Kbps a 1 Mbps hacia la central	☞ 3.6 Km para velocidades superiores a 1.5 Mbps
ADSL Lite/G. Lite	☞ 0.5 Mbps a 1 Mbps hacia el abonado	☞ 5.4 Km para velocidades inferiores a 1.5 Mbps
	☞ 128 Kbps hacia la central	☞ 3.6 Km para velocidades de 1.5 Mbps
UDSL (Universal DSL)	☞ FullDuplex 2 Mbps – 1 par	☞ 4.5 Km
HDSL	☞ FullDuplex 2.048 Mbps (E1) – 2 pares	☞ 4.5 Km
SDSL	☞ FullDuplex 2.048 Mbps (E1) – 1 par	☞ 3 Km
VDSL	☞ 13 Mbps a 52 Mbps hacia el abonado	☞ 300 m a 1.3 Km
	☞ 1.5 Mbps a 2.3 Mbps hacia la central	

Figura 2: Tabla resumen sobre limitaciones de las tecnologías xDSL

Tal como afirma Walter Goralski en *Tecnologías ADSL y xDSL*, “el principal factor que provoca limitaciones dentro de la gama de tecnologías xDSL, tanto en la velocidad, como en la distancia, lo encontramos en el nivel físico” [1]. El medio de transmisión utilizado en sistemas xDSL es, principalmente, el cable de pares de cobre. A pesar de ser el medio más barato y más utilizado a todos los niveles, las prestaciones de los cables de pares que se encuentran instalados en los hogares y empresas, no son lo suficientemente elevadas como para ofrecer mejores resultados que los expuestos en la tabla anterior. En general, se puede afirmar que los pares de cobre como medio de transmisión soportan distancias muy limitadas y velocidades de transmisión de datos poco elevadas –excluyendo los cables de 4 pares Cat. 5a y Cat. 6, propios de sistemas de cableado estructurado más que de bucle de abonado-.

Sería conveniente añadir otra desventaja más al uso de canales de transmisión de cobre, y es precisamente la derivada de su propia composición: la naturaleza del cable le convierte en un medio muy sensible al ruido y a las interferencias.

Todo esto ha llevado a cuestionarse si el medio de transmisión utilizado es el más apropiado para hacer frente a la creciente demanda de nuevos servicios multimedia, tales como aplicaciones en tiempo real (RTA), servicios interactivos bajo demanda, etc.

La necesidad de llevar a los hogares más volumen de datos, con mayor fiabilidad, en menor tiempo y a mayor distancia, supuso la búsqueda de nuevas soluciones basadas en la utilización de medios de transmisión más avanzados que los pares de cobre.

El sistema de transmisión físico con mejores prestaciones existentes a día de hoy en el mercado, capaz de superar las limitaciones de ancho de banda, distancia de transmisión e interferencias entre canales, es la fibra óptica. Este tipo de soporte físico, sustituye la transmisión de señales a través de impulsos electromagnéticos por impulsos luminosos [3]. Además de conseguir un ancho de banda muy superior al ofrecido por los pares de cobre, dada la naturaleza del cable y de sus características de propagación mediante rayos de luz, es un medio insensible a las interferencias electromagnéticas.

La fibra óptica es un medio de transmisión óptimo para soportar enlaces punto a punto, ya que la transmisión a través de este medio es unidireccional. Este hecho, supuso dos graves problemas para incorporarlo al bucle de abonado. Por un lado, era necesaria la incorporación de dos fibras por cada enlace (una dedicada a la transmisión de datos, y otra a la recepción), lo que supone un aumento importante del coste de despliegue de la infraestructura. Y por otra parte, al ser un medio preparado para enlaces punto a punto, impedía la transmisión de información por difusión (*broadcast*) a los usuarios, esencial para los servicios de este tipo, como la televisión y radio digital.

De esta forma, los denominados operadores de cable tuvieron que afrontar la problemática que presentaba el desplegar la fibra óptica, ofreciendo una alternativa más económica, que permitiese la difusión o *broadcast* a los usuarios, y sin que el ancho de banda del sistema se viera fuertemente afectado.

Tras los primeros análisis de estudios comparativos entre diferentes sistemas de transmisión física, algunos operadores lograron mejorar las prestaciones de los servicios ofrecidos por par de cobre a través de la instalación de los denominados cables híbridos (HFC) [4]. Este sistema HFC consiste en la mejora de la infraestructura a través de la implantación de dos medios físicos a lo largo de la red de transmisión:

- Fibra óptica, para la red troncal. Las diferentes centrales telefónicas o nodos primarios se interconectaban entre sí a través de enlaces de fibra óptica. Estas conexiones podían ser mediante enlaces punto a punto, o bien, mediante una topología física en anillo. De esta forma, quedaba garantizada una transmisión central eficiente.
- Cable coaxial, para el bucle de abonado. Este tipo de medio de transmisión, posee características de transmisión similares a las del par de cobre (basado en transmisión de señales electromagnéticas). A pesar de ser un medio más caro que el par trenzado, permite su utilización a más larga distancia y con velocidades de transmisión superiores.

La solución coaxial, también reduce las interferencias intercanales en la transmisión respecto del par de cobre y permite conectar más estaciones en diferentes topologías físicas y lógicas.

Además, dada la naturaleza del cable, este soporte físico permite la bidireccionalidad en las transmisiones, reduciendo el coste de inversión por despliegue,

y la problemática de la difusión a usuarios. Esto convertía al cable coaxial en el medio perfecto para la transmisión de todas las señales de telefonía y datos (incluida la transmisión por difusión de la televisión digital).

El funcionamiento general de los sistemas HFC basados en coaxial sobre el bucle de abonado es muy similar al funcionamiento de los sistemas xDSL sobre par de cobre. Multiplexa, dentro del mismo cable, las señales de voz y datos a diferentes frecuencias, permitiendo la transmisión simultánea de estos servicios en tres canales [2]:

- Canal descendente. La recepción de datos se lleva a cabo a través de un canal de 6 MHz dentro de la banda de frecuencias comprendida entre los 45 MHz y los 860 MHz. Puede llegar a alcanzar velocidades de transmisión de hasta 30 Mbps.
- Canal ascendente. La transmisión de datos se lleva a cabo a través de un canal de 2 MHz dentro de la banda de frecuencias comprendida entre los 5 MHz y los 45 MHz. Puede llegar a alcanzar velocidades de transmisión de hasta 10 Mbps.
- Canal de voz, ubicado en baja frecuencia, hasta los 4 KHz.

A continuación, se muestra un gráfico explicativo sobre el funcionamiento en frecuencia de la tecnología HFC.

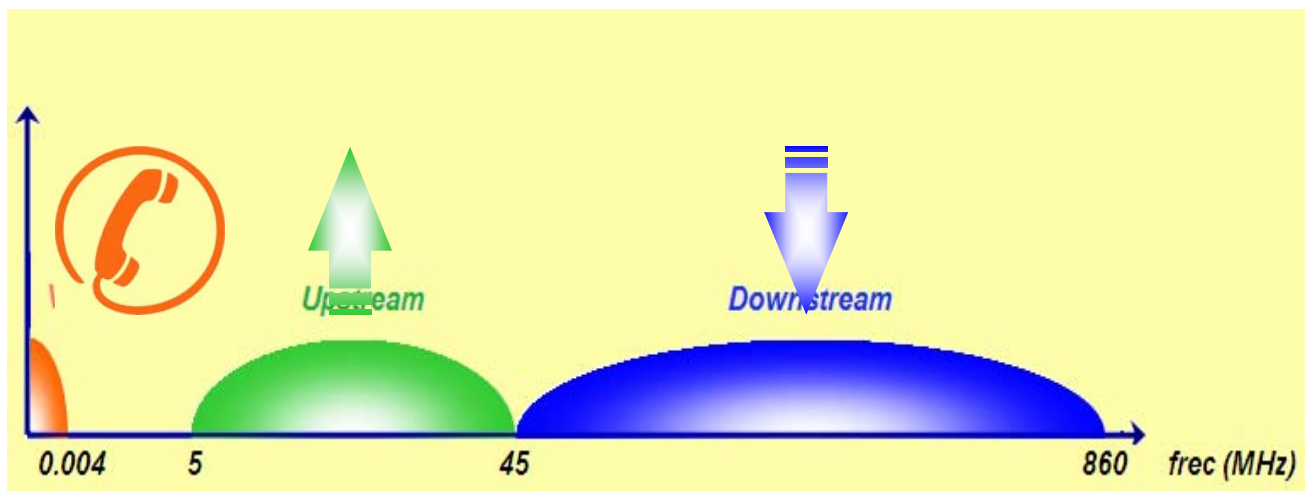


Figura 3: Bandas de frecuencia de canales de transmisión de HFC

La transferencia de datos a frecuencias aun mayores que en los cables de pares, permite aumentar considerablemente el ancho de banda.

Sin embargo, no todo son ventajas para esta tecnología que, a día de hoy, se encuentra en fase de despliegue por los principales operadores de cable. Por un lado, supone una doble inversión económica el despliegue de redes HFC: la zona de red troncal con fibra óptica, que implica la instalación de tubos bifibra (una fibra dedicada a la recepción y otra a la transmisión); y la zona de bucle al abonado con cable coaxial, que implica la utilización de cubiertas protectoras o tubos coarrugados dada la frágil naturaleza del material que lo constituye.

Además, se le suman otras desventajas propias del cable coaxial. Este medio de transmisión posee una atenuación de la señal bastante elevada, lo que provoca la necesidad de instalación de amplificadores cada pocos kilómetros para el caso de señales analógicas. Para el caso de transmisión de señales digitales, es necesaria la instalación de un amplificador por kilómetro [5].

A lo anterior, hay que sumarle el ruido térmico, producido por el aumento de temperatura del material resultante de la agitación de los electrones en el conductor – propio pues de la transmisión electromagnética-; y el ruido de intermodulación, producido por la multiplexación de señales dentro del mismo canal de transmisión, y que origina un ruido de frecuencia combinada entre las diferentes frecuencias de las señales que se transmiten [5].

Basándose en el buen resultado de las redes HFC, e intentando solventar los problemas que ocasiona la propia red híbrida, nace un nuevo concepto de red y bucle de abonado, y que será objeto de descripción del presente proyecto. Observando las particularidades anteriores, se puede extraer en conclusión que la mayoría de los problemas de las redes de datos de alta velocidad los ocasionan los medios basados en la transmisión de señales electromagnéticas. Por otra parte, los medios de transmisión basados en la transferencia de señales luminosas, multiplican los beneficios y reducen los problemas anteriores. ¿Por qué no construir toda la red homogéneamente, sólo con fibra óptica? ¿Por qué discriminar al bucle de abonado, pudiendo gozar de las mismas características que la red troncal?

1.2. Objetivos

El objetivo del presente proyecto, pretende demostrar que el bucle de abonado también puede estar construido a través de fibra óptica, confiriendo al mismo los beneficios que supone la transmisión de información a través de este medio. Estas redes, que ya han tenido sus primeros avances en algunas zonas del Este de la UE y Japón, se denominan FTTH (*Fiber To The Home*), y provienen de la familia de transmisión FTTx, entre los que se encuentran algunos de los explicitados en el apartado anterior.

A lo largo del presente documento, se explicarán los fundamentos físicos y estructurales de las redes FTTH, prácticamente inexistentes en nuestro país, y que supone la llegada de la fibra óptica hasta el hogar, permitiendo la distribución de servicios avanzados de datos, como el Triple Play, Internet de banda ancha y televisión digital por cable.

La estructura del documento permitirá establecer varios criterios que justificarán la utilización de la fibra óptica hasta los hogares y negocios, rompiendo con la barrera de los tópicos que se mueven en torno a los medios de transmisión de fibra óptica, entre los que se encuentran el precio de construcción, explotación y mantenimiento, así como la extrema sensibilidad de estos medios de transmisión.

Por tanto, los objetivos del proyecto girarán en torno a tres ejes fundamentales:

- La teoría general y los fundamentos físicos que explican los beneficios de las redes basadas en fibra óptica, en este caso, de las redes FTTH.
- El diseño de ingeniería de la red de transmisión, que especificará todos los pasos necesarios para el diseño de una red FTTH, incluyendo todos los actores y elementos implicados en el sistema.
- La instalación y construcción de la red, a partir de un diseño de ingeniería único basado en la ausencia de fusiones y pérdidas en la red, mejorando notablemente los resultados generales de una red FTTH convencional.

Y relacionado con estos tres ejes, se pueden establecer tres objetivos fundamentales, que se intentarán conseguir mediante el desarrollo del presente proyecto. Son:

- Argumentar a nivel teórico los beneficios de las redes FTTH y de las redes de comunicaciones basadas en medios de transmisión de fibra óptica FTTx.
- Conocer y comprender cómo desplegar una red FTTH al completo, tanto a nivel de diseño de ingeniería, como a nivel de construcción física de la red en campo.
- Mejorar la estructura convencional de las redes FTTH, a través de la introducción de elementos de diseño y construcción novedosos, que permiten reducir notoriamente los problemas típicos de este tipo de redes.

Los datos teóricos, se contrastarán con los datos reales procedentes de medidas de retroespaciamento y reflectometría una vez desplegada la red completa en campo, objeto de estudio del presente proyecto.

La descripción del diseño de ingeniería e instalación, se considerarán bajo un piloto real a desplegar en un barrio de Madrid (Vicálvaro). De esta forma, ayudará a comprender y explicar los aspectos teóricos del sistema, así como a ejemplificar de forma práctica las particularidades reales que suceden en el despliegue real de este tipo de redes.

Hasta poder llegar a establecer servicios de alta velocidad de datos a los usuarios finales, es necesario que el diseño de ingeniería de la red pase a través de dos fases claramente diferenciadas:

- a) El diseño de la red pasiva. Es la primera fase de diseño, y está constituida por todos los elementos físicos y estructurales que componen el entramado de la red, desde su inicio en una central telefónica, hasta cada una de los hogares o negocios que dispondrán del servicio.
- b) El diseño de la red activa. Es la segunda fase del diseño, y está constituida por todos los equipos de comunicaciones y demás elementos activos que permiten la transferencia de datos desde la central hasta los hogares, y que facilitan los servicios reales a los usuarios finales.

Dado que la segunda fase del diseño consiste en la instalación de equipos muy específicos propios de cada fabricante, suministrados por el operador de comunicaciones que proporcionará los servicios finales, no tiene mayor relevancia entre los objetivos a conseguir en el presente proyecto.

Los equipos de comunicaciones que constituyen la parte activa de una red FTTH, no condicionan físicamente la transferencia de información ya que tan sólo filtran los servicios por usuario de una o varias zonas geográficas determinadas. Este hecho, hace que el estudio de la parte activa de la red se vea reducido única y exclusivamente al estudio de los equipos en sí, siendo éste muy particular y sin capacidad de poder extrapolar datos obtenidos a otros equipos, suministrados por otros fabricantes.

Sólo será objeto de desarrollo del presente proyecto el diseño de la red pasiva. El hecho de que sea un estudio muy generalista, permite que el diseño físico de la red sea extrapolable a cualquier situación y a cualquier red de la misma tipología. Además, permite profundizar en diversos conocimientos, tales como los fundamentos físicos de la fibra óptica, o la planificación de cableados estructurados.

Capítulo 2

Introducción al Sistema FTTH

El siguiente capítulo está constituido por una extensa recopilación sobre los sistemas de transmisión óptica FTTx, y concretamente el sistema FTTH sobre el que se basa el diseño y despliegue de la red propuesta en el proyecto. Así pues, se describe el funcionamiento general de este tipo de redes, estándares de arquitectura y estructura de funcionamiento, así como su situación actual en el mundo y los servicios que ofrece y que, en un futuro próximo será capaz de ofrecer. Todo ello permitirá ofrecer una visión global de la tecnología FTTH, así como conocer en profundidad las particularidades concretas de este tipo de redes.

2.1. Introducción a las redes FTTx

Las redes FTTH pertenecen a la familia de sistemas de transmisión FTTx dentro del mundo de las telecomunicaciones. Estas redes, consideradas de banda ancha, tienen la capacidad de transportar gran cantidad de datos e información a velocidades binarias muy elevadas, hasta un punto próximo al usuario final.

La familia FTTx, comprende un conjunto de tecnologías basadas en el transporte de señales digitales a través de fibra óptica como medio de transmisión. Existen diferentes niveles de alcance, en función del grado de acercamiento de la fibra óptica hasta el usuario final, que surgen como consecuencia de un mayor o menor abaratamiento de estos sistemas.

Todas las redes FTTx, admiten una configuración lógica de red en árbol o estrella, en bus, y en anillo, y en todas ellas con la posibilidad siempre de utilizar componentes activos dependiendo de la localización de los usuarios o clientes finales.

Las denominaciones y características, según el grado de penetración de FTTx, se recogen en la tabla de la figura 4 [5]:

Denominación	Alcance	Distancia métrica
FTTN	Fiber To The Node (fibra hasta el nodo)	Fibra Óptica desde la central hasta una distancia del edificio entre 1.5 – 3 km
FTTC	Fiber To The Curb (fibra hasta la acera)	Fibra Óptica desde la central hasta una distancia del edificio entre 300 – 600 m
FTTB	Fiber To The Building or Bussiness (fibra hasta el edificio o negocio)	Fibra Óptica desde la central hasta el Cuarto de Telecomunicaciones del edificio, sin incluir tendido hasta el hogar
FTTH	Fiber To The Home (fibra hasta el hogar)	Fibra Óptica desde la central hasta el PTR de los hogares

Figura 4: Tabla resumen con las características de las tecnologías FTTx

Existen otras denominaciones que, de forma paralela, fueron surgiendo según fue avanzando esta tecnología, y que sin embargo, no se consideran estandarizadas. No obstante, es conveniente nombrarlas, debido a que en muchos ambientes, utilizan esta nomenclatura [2]:

- *FTTCab*: Fiber To The Cabinet (fibra hasta el armario, a la intemperie)
- *FTTP*: Fiber To The Premises (fibra hasta las instalaciones)
- *FTTO*: Fiber To The Office (fibra hasta la oficina)
- *FTTU*: Fiber To The User (fibra hasta el usuario)

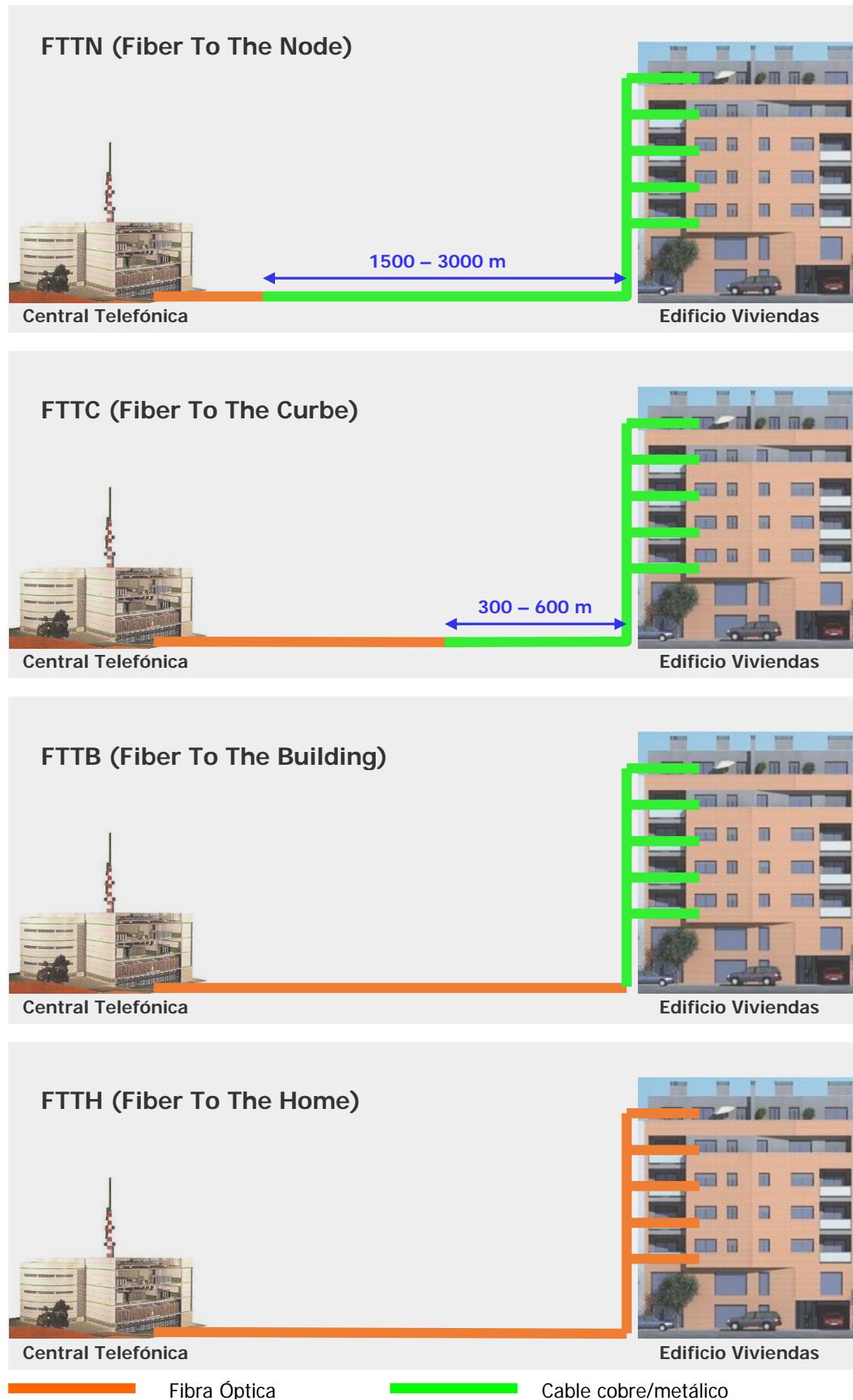


Figura 5: *Arquitectura general de las tecnologías FTTx*

La utilización de fibra óptica como medio de transmisión hasta los hogares, y por tanto, hasta los usuarios finales, garantiza una red completamente adaptada tanto a las necesidades actuales, como futuras. La reutilización de esta infraestructura física supone un ahorro económico a lo largo del tiempo, a pesar de su fuerte desembolso inicial en la fase de despliegue, amortizándolo en muy poco tiempo.

La instalación de fibra óptica hasta edificios residenciales es prácticamente inexistente en España, dado el grado de despliegue de tecnologías alternativas más maduras, y aparentemente más económicas para los operadores, como son xDSL, PLC, HFC, etc. Sin embargo, la demanda exponencial de aumento de ancho de banda y velocidad de transmisión, es superior al que estas tecnologías son capaces de ofrecer, y en línea evolutiva, están llegando a la limitación más importante e insalvable: el medio físico no soporta tanto caudal de datos a tales velocidades. De ahí que sea necesario un cambio drástico del canal, que permita establecer un conducto de banda ancha, mucho mayor a las vistas hasta día de hoy: la fibra óptica.

2.2. Arquitectura general de una red FTTH

La tecnología FTTH pasar por la implantación de fibra óptica en toda la red global, incluido el troncal del operador. En relación con el bucle de abonado, que es el tema a tratar, propone la inclusión de la fibra desde la central telefónica, hasta cada hogar que demande servicios.

Cualquier tipo de red FTTH, sea cual sea su configuración y arquitectura final, propone una utilización del medio físico a través de la multiplexación por longitud de onda (WDM), desde la central hasta cada usuario [2].

La interconexión entre el abonado final y el nodo de distribución que prestará los servicios, puede realizarse a través de varias configuraciones físicas, que se detallan a continuación.

2.2.1 Configuración Punto a Punto

La configuración punto a punto, en cuanto a fibra óptica se refiere, se concreta exactamente en enlaces entre el nodo central y el usuario final. Este tipo de arquitectura, en muchos casos no es considerado como parte de la clasificación de FTTH, aunque siguiendo el contexto detallado anteriormente, debe de ser considerado como un caso muy particular [5].

Los enlaces de transmisión punto a punto son explotados por empresas que disponen de acceso a la fibra óptica en planta externa, y que necesitan conectar ubicaciones apartadas con una cierta capacidad de comunicaciones, que puede variar desde un enlace de voz o telefonía, hasta un enlace de datos de alta velocidad.

En cuanto a la parte activa de la red se refiere, cabe destacar que los equipos utilizados para la transmisión de información en enlaces punto a punto son PDH o SDH, así como WDM. Estos enlaces gozan de alta capacidad, y son muy útiles en el mundo empresarial.

Sin embargo, no todo son ventajas. En caso de utilizar esta configuración para usuarios domésticos, supondría un elevado coste de despliegue, al que ningún operador, ya sea de telecomunicaciones o neutro, está dispuesto a enfrentarse.

Además, rompería el esquema de configuración global de la red, debido a que la configuración en estrella o árbol, se iría desmantelando, aumentando el coste de ampliación de la red, así como el de operación y mantenimiento.

2.2.2 Configuración Punto a Multipunto: PON

La configuración punto a multipunto en cuanto a fibra óptica se refiere, es en el que se basan las redes FTTH. Comúnmente, a esta configuración se la denomina PON (*Passive Optical Network*) o Red Óptica Pasiva. A lo largo del proyecto, las referencias a la configuración punto a multipunto, se harán a través de la denominación PON.

La arquitectura basada en redes PON o redes ópticas pasivas, se define como un sistema global carente de elementos electrónicos activos en el bucle de abonado. Toda red PON consta de los siguientes elementos pasivos [6]:

- *ODN*: red de distribución óptica (*optical distribution network*). Consiste en la red en sí misma que distribuye la señal desde la centralita hasta los hogares. Está constituida por cables de fibra óptica, los divisores pasivos o splitters y los armarios y paneles distribuidores de fibra óptica.
- *OLT*: terminación óptica de línea (*optical line termination*). Consiste en un elemento pasivo ubicado en la cabecera de la red o centralita, y generalmente se instala uno por cada fibra óptica.
- *ONT*: terminación óptica de red (*optical network termination*). Consiste en elementos pasivos que se ubican en las dependencias de los usuarios finales. Típicamente suelen ser un máximo de 32.
- *Splitter*: divisor óptico pasivo. Se considera el elemento principal de la red, ya que es el encargado de direccionar las señales desde el equipo activo de la red, hasta cada usuario en particular.

La filosofía general de esta arquitectura, consiste en compartir los costes de un mismo segmento óptico entre los diferentes terminales, de forma que se pueda reducir el número de fibras ópticas, reduciendo el coste de despliegue, así como el de mantenimiento de la red.

De esta forma, varios usuarios comparten el mismo canal físico, gracias a los divisores ópticos. El funcionamiento de un splitter, es muy básico. Dependiendo de la dirección del haz de luz procedente de un extremo, divide el haz entrante en múltiples haces de luz, distribuyéndolos hacia múltiples fibras, o bien, lo combina dentro de una misma fibra óptica. Gracias a esto, por ejemplo, una misma señal de video se puede transmitir a múltiples usuarios.

A continuación se muestra gráficamente los elementos que constituyen una red PON genérica:

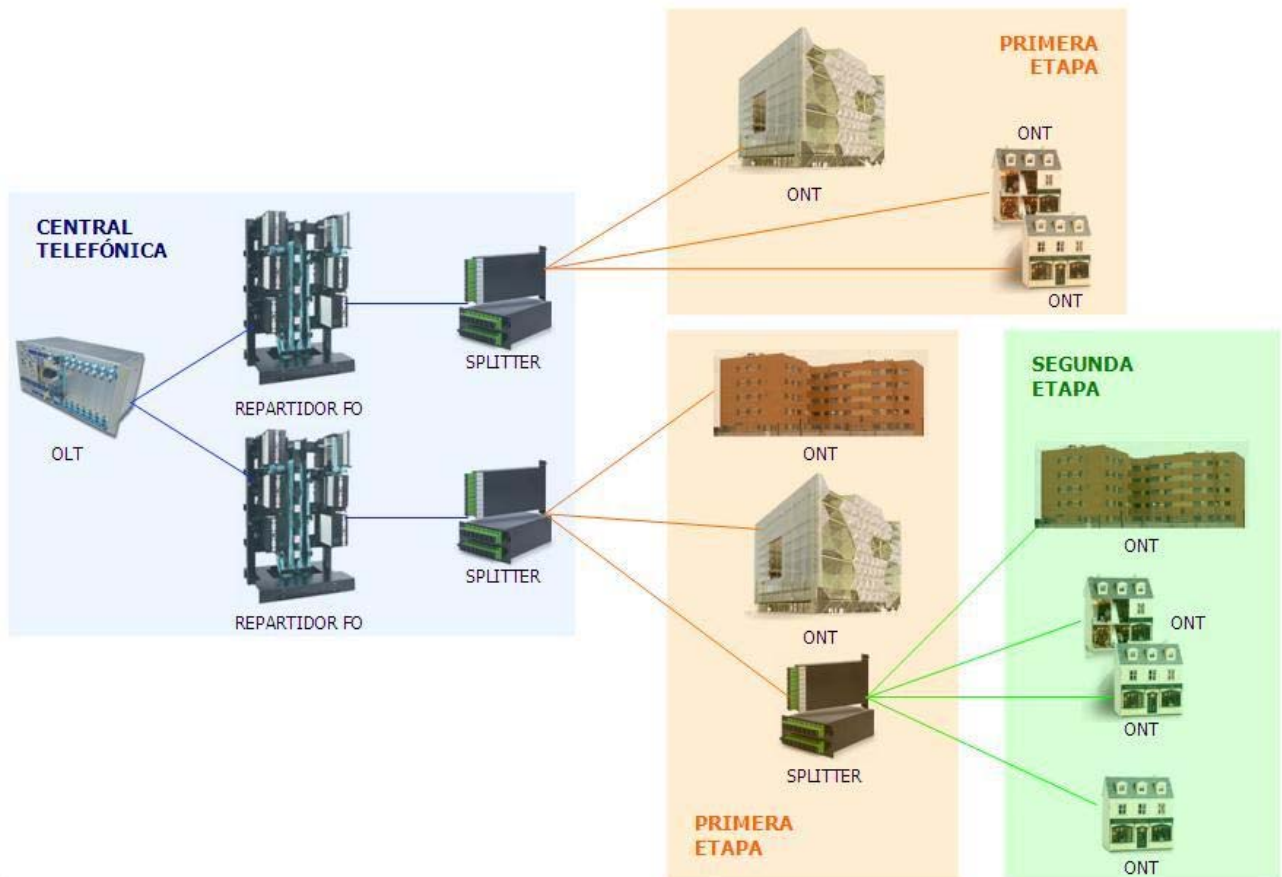


Figura 6: Esquema genérico de una red PON

Tal y como se puede observar en la figura anterior, basta con un solo OLT como cabecera de la red, para dar servicio a varias ONT implicadas en la misma. La conexión general consiste en un equipo OLT conectado a fibra óptica a través de un repartidor de fibra, que organiza los canales de información.

La señal luminosa procedente del OLT, se divide pasivamente a través de un divisor de cabecera, o divisor de 1ª etapa, en un número determinado de fibras ópticas que acceden directa o indirectamente a los usuarios finales. En ellos, se ubica un ONT, que es el que les proporciona el servicio.

Cada vez que una señal procedente de cabecera pasa a través de un divisor, éste la divide en tantas señales como fibras de salida tenga conectadas, originando las

denominadas etapas de conexión o servicio. Se denomina al primer divisor de cabecera, ubicado cerca del OLT, como divisor de 1ª etapa, y origina la 1ª etapa de conexión.

La primera etapa de conexión, puede estar constituida por ONTs, y por tanto, conectada directamente al OLT a través del divisor de primera etapa; o bien puede haber más divisores, encargados de subdividir nuevamente la señal procedente del divisor anterior. A estos divisores se les denomina divisores de 2ª etapa, y dan lugar a la 2ª etapa de conexión. Y así sucesivamente.

Esta arquitectura origina una estructura arbolada, lo que da lugar a una red que goza de gran flexibilidad y sencillez, permitiendo que el coste de operación y mantenimiento de la misma sea menor.

Sin embargo, esta tipología no es única. Las topologías lógicas de las redes FTTH, pasan también por configurar una estructura de transmisión en bus, y en anillo, donde el OLT es la cabecera de la red, y las ONT los elementos secundarios que cuelgan de la red. Sin embargo, estas configuraciones no son habituales a la hora de diseños de ingeniería eficientes. A continuación, aparece un gráfico de las topologías lógicas que se pueden dar en una red FTTH [2].

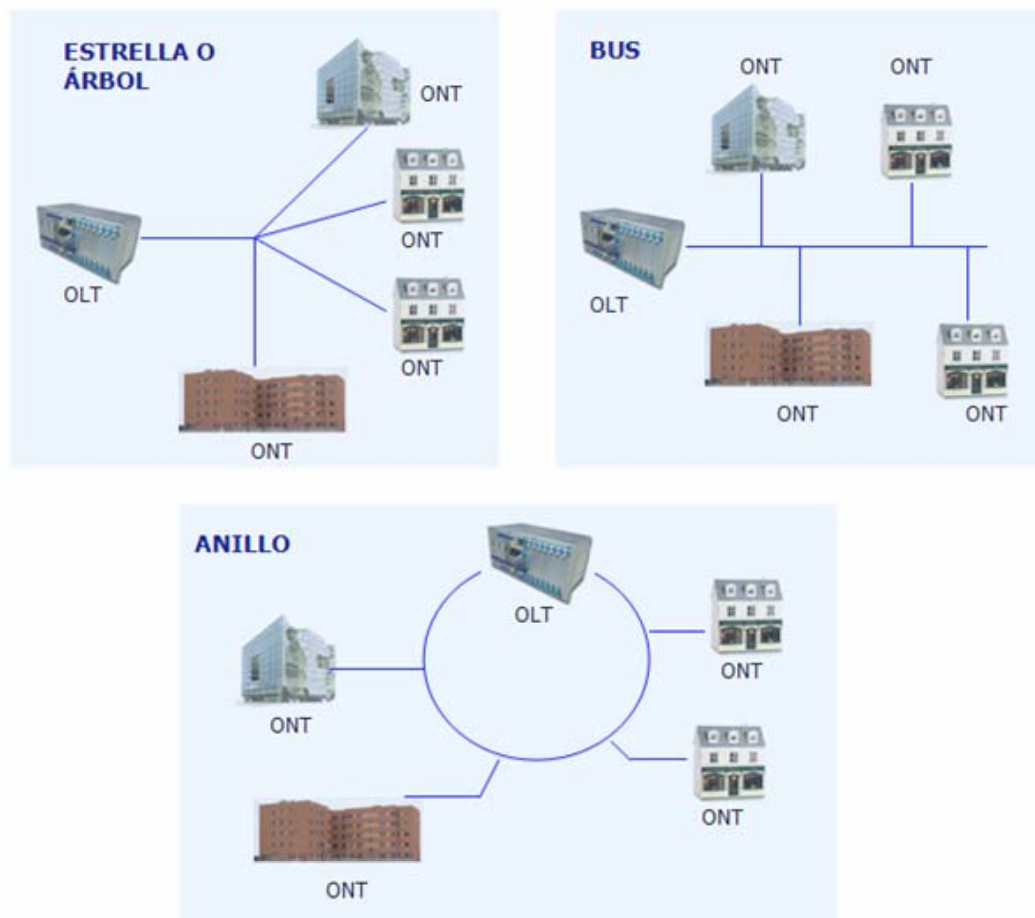


Figura 7: Topologías lógicas de las redes PON

2.3. Funcionamiento genérico de una red PON

Tal y como se ha reseñado en el apartado anterior en términos generales, una red óptica pasiva funciona siempre bajo la transmisión entre el OLT y las diferentes ONT a través de los divisores ópticos, que multiplexan o demultiplexan las señales en función de su procedencia y destino.

Aparecen por tanto, tres figuras claramente diferenciadas en la red: el OLT, el ONT y el divisor, cada uno de los cuales tiene una función necesaria y prioritaria en la red pasiva PON. A continuación se detallan la función y características generales de cada uno de ellos.

2.3.1. El OLT

El OLT, actúa como el elemento de cabecera de la red PON encargado de gestionar el tráfico de información en dirección a los usuarios ONT o proveniente de ellos. Y además, actúa de puente con el resto de redes externas, permitiendo el tráfico de datos con el exterior.

Cada OLT, adquiere datos de tres fuentes diferentes de información, actuando como concentrador de todas ellas. Así pues, el OLT de cabecera tiene conexión con las siguientes redes [6]:

- **PSTN** (*public switched telephone network*) o RTB (red telefónica básica), para los servicios de voz; el OLT se conecta a través de un router de voz o un *gateway* de voz mediante interfaz correspondiente MGCP (*media gateway controller protocol*) o protocolo de controlador *gateway* de medios de comunicación.
- **Internet**, para los servicios de datos o VoIP; el OLT se conecta a través de un router o *gateway* IP/ATM de voz, mediante encapsulamiento IP sobre ATM.
- **Video broadcast** o VoD (*video on demand*), para los servicios de videodifusión; el OLT se conecta directamente, o bien indirectamente a través de un router o *gateway* ATM.

Sin embargo, el OLT no es un hardware único, sino que se subdivide en tres módulos o equipos diferentes, cada uno de ellos encargados de gestionar un tráfico determinado. Así pues, existen tres subtipos de OLT [7]:

- a) **P-OLT**, OLT proveedor (*provider OLT*). Este equipo tiene dos tareas fundamentales:
 - Es el encargado de recoger infinidad de tramas de voz y datos agregadas que se dirigen hacia la red PON, procedentes de las redes RTB e Internet, y las transforma en señales inyectables en las diferentes ramas de los usuarios por difusión a través del protocolo

TDM o multiplexación por división en el tiempo (*time division multiplexing*). Para ello, utiliza una longitud de onda dedicada, siendo ésta 1490 nm.

- Absorbe todas las tramas de voz y de datos procedentes de los ONT de usuarios, concentrándolos en una sola vía de escape en función de la naturaleza de los datos recibidos. Así pues el tráfico de voz lo redirige hacia la RTB, y el tráfico de datos hacia la red Internet. Para ello, utiliza una longitud de onda dedicada, siendo ésta 1310 nm.

El P-OLT además de concentrar la información, y dividirla en función de su naturaleza (voz-datos), también se encarga de multiplexar el canal descendente (en dirección a los ONT) y ascendente (en dirección al OLT) a través de la misma fibra.

- b) **V-OLT**, OLT de video (*video OLT*). Este equipo se encarga únicamente de transportar las tramas de video y video bajo demanda VoD procedentes de la red de videodifusión, hasta los ONT de los usuarios. Para ello, transforma las tramas de video en señales inyectables en las ramas de todos los usuarios (difusión), que viajan en una longitud de onda dedicada: 1550 nm.
- c) **M-OLT**, OLT multiplexador (*multiplexer OLT*). Es un equipo multiplexor WDM que permite la multiplexación y demultiplexación entre las señales procedentes del P-OLT y V-OLT.

A continuación se muestra gráficamente el funcionamiento de un OLT completo, conectado a diferentes redes de voz (PSTN), video (VideoBroadcast) y datos (Internet) [6].

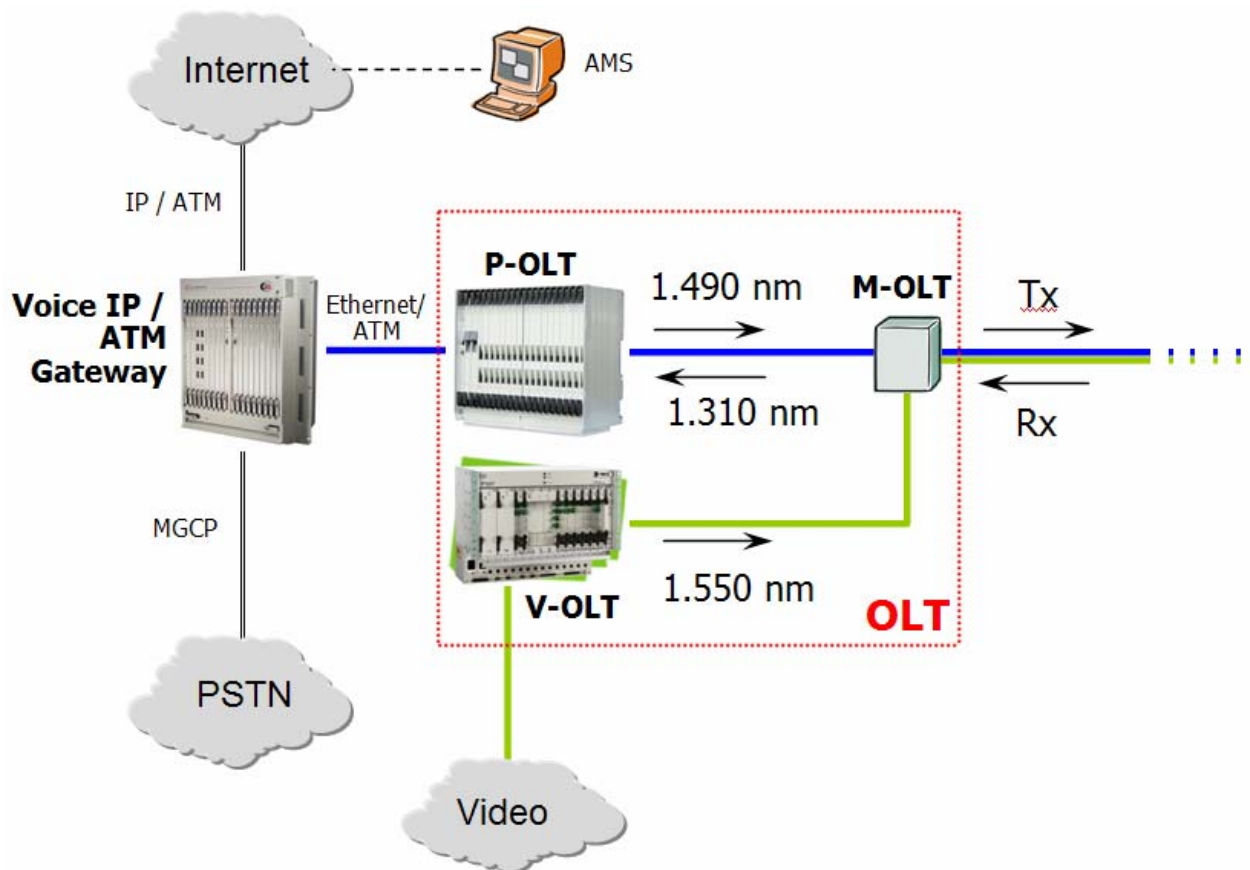


Figura 8: Funcionamiento del OLT a nivel global

Así pues, cada OLT tiene la tarea de evitar interferencias entre los contenidos del canal descendente y ascendente, utilizando dos longitudes de onda diferentes superpuestas. Para ello utiliza técnicas WDM (*wavelength division multiplexing*), basadas en el uso de filtros ópticos: multiplexación por división en longitud de onda.

Por último, cabe destacar que los OLT también poseen dimensionadores de distancias, capaz de calcular la diferencia de distancia entre el usuario final y la centralita. Esta función tiene relación directa con la potencia de transmisión del OLT hacia un ONT determinado.

Los OLT no emiten la misma potencia de luz a todos los ONT de forma equitativa, sino que depende de la distancia a la que se encuentren de la central. De esta forma, un usuario cercano a la central necesitará menor potencia de la ráfaga de contenidos, mientras que un usuario lejano necesitará una potencia más elevada.

2.3.2. El ONT

Los ONT son elementos capaces de filtrar la información asociada a un usuario concreto procedente del OLT. Además, tienen la función de encapsular la información

de un usuario y enviarla en dirección al OLT de cabecera, para que éste la redireccione a la red correspondiente. Se encuentran generalmente instalados en los hogares junto a la roseta óptica correspondiente.

Existen dos tipos de ONT según su función [6]:

- **H-ONT**, u ONT del hogar (*Home ONT*), preparado para ser instalado en los hogares y otorgar servicios a un usuario en particular. En este caso, la fibra llega hasta los hogares, y entra dentro del despliegue FTTH.
- **B-ONT** u ONT de edificio (*Building ONT*), preparado para ser instalado en los R.I.T.I. o cuartos de comunicaciones de los edificios privados o empresas, y que se encuentran capacitados para dar servicio a varios usuarios conectados a él a través de un repartidor. En este caso, la fibra no llega hasta el hogar, sino hasta el edificio, denominándose FTTB.

Cada ONT recibe todas las señales enviadas por su ONT de cabecera correspondiente, al igual que el resto de ONTs de su misma etapa. La información de los OLT se transmite mediante difusión **TDM**, y por lo tanto, llega a todos los ONT por igual. Sin embargo, el ONT tiene la tarea de filtrar aquella información que sólo vaya dirigida él mismo (en un intervalo temporal determinado) [8].

El filtrado de la información, se lleva a cabo a nivel de protocolo Ethernet, a través de las denominadas tramas PEM (*PON encapsulation method*). La trama, consta de tres campos [9]:

- **Cabecera** (*header*); este campo contiene información sobre sincronización de la trama.
- **CRC**; que permite conocer si la información enviada ha llegado correctamente y sin errores a su destino
- **Carga útil** (*Payload*); son los datos a enviar

A continuación, se muestra gráficamente el funcionamiento de este filtrado de difusión por TDM [8].

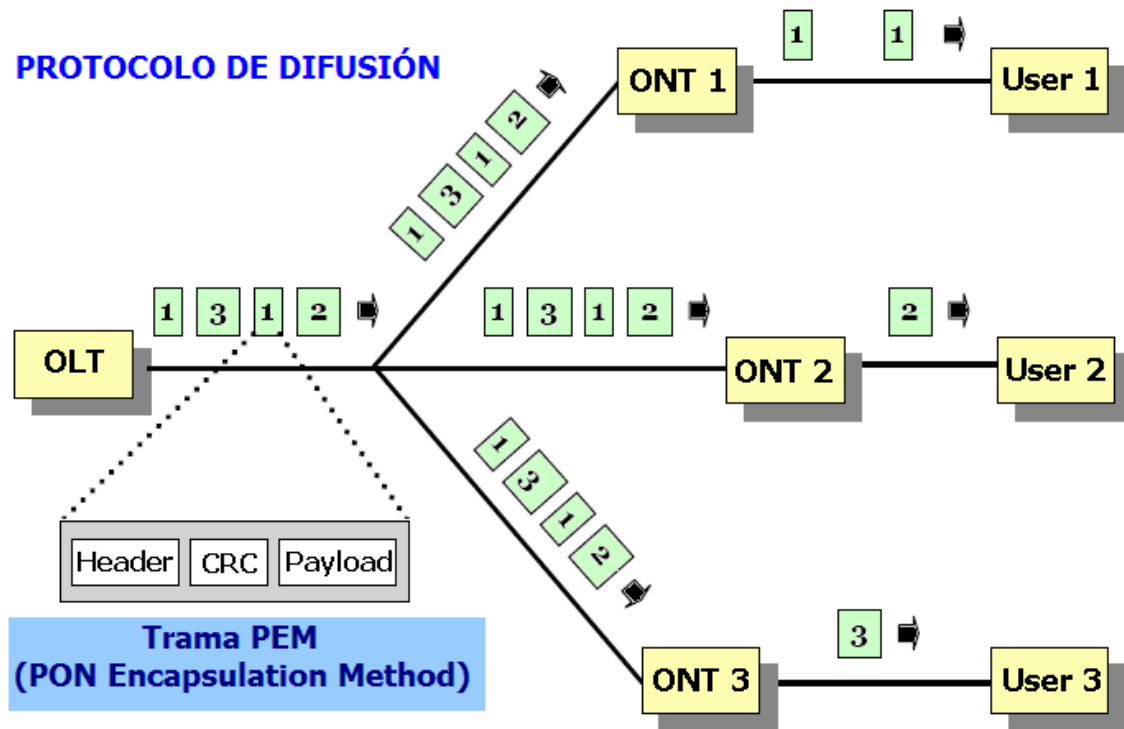


Figura 9: Funcionamiento del protocolo de difusión en una red PON

Una vez filtrada la información que le interesa, el ONT diferencia entre las señales de video, procedentes del V-OLT, y las tramas de voz y datos, procedentes del P-OLT. Para realizar este segundo filtrado, el módulo electroóptico posee dos fotodiodos: uno analógico APD (*analogic photo-diode*) y otro digital DPD (*digital photo-diode*). Los filtros ópticos son [10]:

- **OAF**, filtro óptico analógico (*optical analogic filter*); la señal de video a 1550 nm se demultiplexa en longitud de onda con este filtro, atacando al fotodiodo analógico APD para realizar la conversión en frecuencia.
- **ODF**, filtro digital óptico (*optical digital filter*); la señal de voz y datos a 1490 nm se demultiplexa en longitud de onda con este filtro, atacando al fotodiodo digital DPD.

Por otra parte, el ONT no sólo recibe y filtra información procedente del OLT, sino que también envía información a este último en una longitud de onda dedicada de 1310 nm.

El ONT dispone de un LED encargado de enviar las señales luminosas hacia el OLT. Para evitar la colisión de información entre usuarios, utilizan un protocolo de TDM (multiplexación por división temporal), que gestiona el OLT, asignando intervalos temporales a cada ONT.

A continuación se muestra un esquema gráfico de funcionamiento del ONT basado en filtros ópticos y diodo LED de transmisión [6].

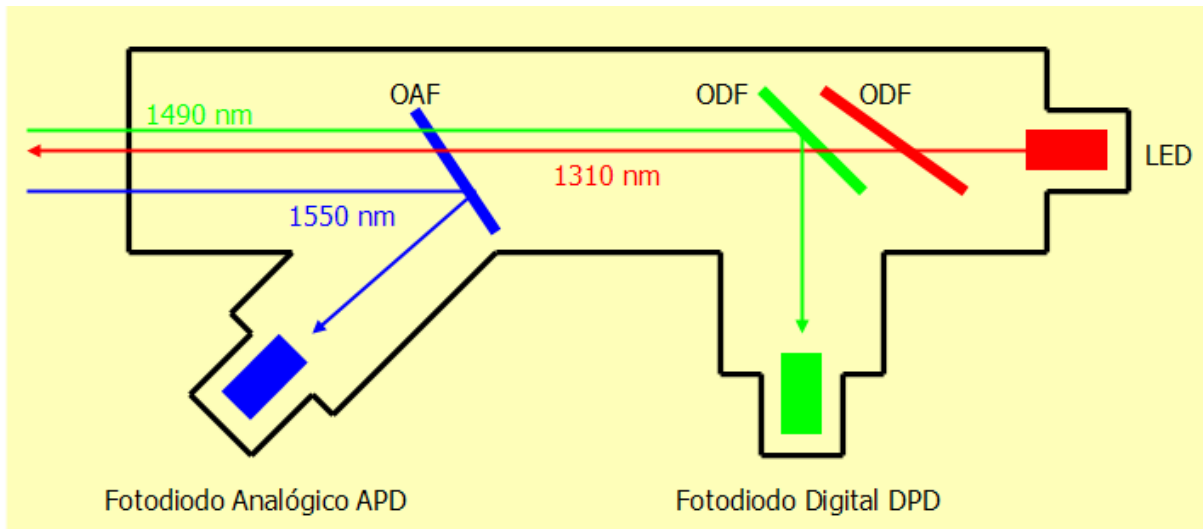


Figura 10: *Funcionamiento interno de un ONT*

2.3.3. El divisor óptico (*splitter*)

Los *splitters*, son divisores de potencia pasivos que permiten la comunicación entre el OLT y sus respectivos ONT a los que presta servicio. Sin embargo, no sólo se dedican a multiplexar o demultiplexar señales, sino que también combinan potencia: son dispositivos de distribución óptica bidireccional, con una entrada y múltiples salidas:

- La señal que accede por el puerto de entrada (enlace descendente), procede del OLT y se divide entre los múltiples puertos de salida.
- Las señales que acceden por las salidas (enlace ascendente), proceden de los ONT (u otros divisores) y se combinan en la entrada.

El hecho de ser elementos totalmente pasivos, les permite funcionar sin necesidad de energización externa, abaratando su coste de despliegue, operación y mantenimiento. Tan sólo introducen pérdidas de potencia óptica sobre las señales de comunicación, que son inherentes a su propia naturaleza.

Existe una relación matemática inversa entre las pérdidas introducidas por el divisor, y el número de salidas del mismo, siendo ésta [2]:

$$\text{Atenuación}_{\text{SPLITTER}} = 10 \log \frac{1}{N}$$

Así pues, un divisor de potencia con dos salidas, en el peor de los casos, pierde 3 dB (la mitad de la potencia) en cada salida.

Gráficamente, se puede expresar el funcionamiento de un divisor con la siguiente figura [6].

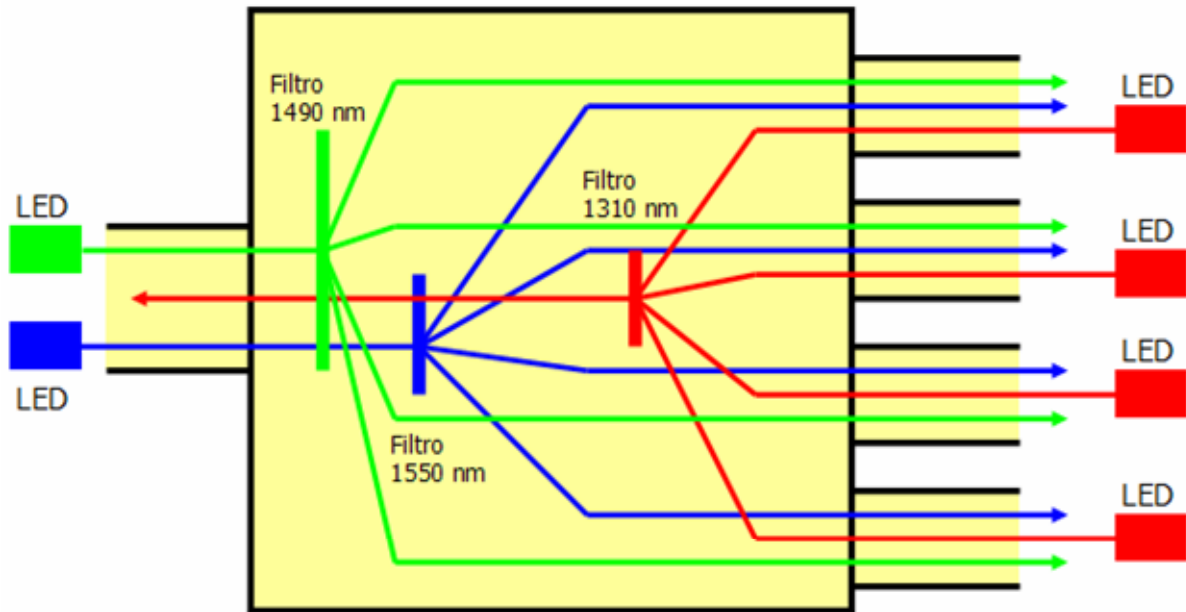


Figura 11: *Funcionamiento genérico de un divisor óptico*

Existen diversos tipos de divisores, ya que no todos se construyen a partir de la misma tecnología. No obstante, los divisores más habituales son de dos tipos:

- Para dispositivos con gran número de salidas (> 32 salidas), se utilizan divisores realizados basándose en tecnología planar.
- Para dispositivos con menor número de salidas (< 32 salidas), se utilizan divisores realizados a base de acopladores bicónicos fusionados.

2.3.4. Descripción del funcionamiento de la red de transmisión PON

Una vez detallados todos los elementos que constituyen la red PON, es necesario conocer como funciona el sistema de forma global, y por tanto, el comportamiento de la red con todos los elementos interconectados entre sí, desde la cabecera OLT, hasta los usuarios ONT, y viceversa.

Lo más importante a destacar en el funcionamiento genérico de la red, es la existencia de dos canales, uno ascendente y otro descendente. Sin embargo, ambos (de manera general) viajan a través del mismo medio físico, por lo que se utilizan técnicas WDM (CWDM/DWDM) que permiten que los datos del canal descendente no colisionen con los del ascendente. Para ello, se asignan diferentes longitudes de onda a cada canal y en función del tráfico, coexistiendo en la misma fibra un mínimo de 3 longitudes de onda diferentes: una para el tráfico de video del canal ascendente, y otras dos para el tráfico de datos del ascendente y del descendente respectivamente.

Se analizarán con más detalle ambos canales de transmisión.

2.3.4.1. Canal descendente

El canal descendente es el sentido de información procedente del OLT del operador hasta los ONT ubicados en los usuarios finales. En este canal, la red PON se comporta como una red punto-multipunto.

La OLT recoge infinidad de tramas de voz y datos agregadas que se dirigen hacia la red PON, a través del P-OLT (voz y datos) y el V-OLT (video). Las tramas recogidas por estos equipos, las transforman en señales inyectables en las diferentes ramas de los usuarios. Estas ramas están conformadas por una o dos fibras que conducen las señales bi o unidireccionales, y que se encuentran acopladas pasivamente mediante divisores de potencia que permiten la unión de todos los ONT de la red, sin necesidad de regeneración intermedia de señales (evitando elementos activos).

Estos divisores son los encargados de recibir la información procedente del OLT y filtrar y enviar al usuario final aquellos contenidos que vayan dirigidos a él. En este procedimiento, se utiliza un protocolo de difusión basado en TDM (*time division multiplex*), enviando la información de cada usuario en diferentes instantes de tiempo.

El OLT tiene prefijados diferentes intervalos temporales que corresponden cada uno de ellos a un usuario determinado, de tal forma que en función de cada segmento temporal, el ONT de cada usuario filtra la información destinada a él.

Un aspecto importante a considerar son las longitudes de onda (λ) a las que transmiten información las OLT hacia las ONT. Estas longitudes, varían en función de si la rama del árbol o conexión del ONT, dispone de una conexión monofibra o bifibra.

Si la conexión del divisor con el ONT se produce a través de dos fibras ópticas, una de ellas está dedicada al canal descendente, por lo que la información viaja en las siguientes longitudes de onda [11]:

- Voz y Datos: $\lambda_D = 1310 \text{ nm}$
- Video: $\lambda_V = 1550 \text{ nm}$

Si la conexión del divisor con el ONT se produce a través de una fibra óptica, el mismo canal sirve tanto para la transmisión como para la recepción, otorgándole a cada una de ellas una longitud de onda específica. Para el caso del canal descendente, serían las siguientes [11].

- Voz y Datos: $\lambda_D = 1490 \text{ nm}$
- Video: $\lambda_V = 1550 \text{ nm}$

2.3.4.2. Canal ascendente

El canal ascendente es el sentido de información procedente del ONT del usuario final, hasta el OLT del operador. En este canal, la red PON se comporta como una red punto a punto.

Cada ONT recoge las tramas de voz y datos agregadas de cada usuario y que se dirigen hacia el OLT. En este punto, el ONT realiza la misma operación que el OLT en el canal descendente, es decir, convierte las tramas en señales inyectables a través de la fibra óptica dedicada al usuario.

El divisor de cada etapa, es el encargado de recoger la información procedente de todos sus ONTs correspondientes y multiplexarla en una única salida de fibra, en dirección al OLT del operador.

Para poder transmitir la información de los diferentes ONT sobre el mismo canal, es necesario, al igual que en el canal descendente, la utilización de TDMA, de tal forma que cada ONT envía la información en diferentes intervalos de tiempo, controlados por la unidad OLT.

En cuanto a las longitudes de onda de trabajo, cabe destacar que independientemente de si la conexión del ONT con el divisor es bifibra o monofibra, la longitud de onda de trabajo del canal ascendente es siempre la misma. La información enviada por el usuario (voz y/o datos), viaja siempre a [11]:

- Voz y Datos: $\lambda_D = 1310 \text{ nm}$

Con el sistema descrito anteriormente, se está ideando una red entramada en estructura de árbol o estrella, con infinitud de posibilidades físicas y lógicas de servicios a los usuarios.

Gracias a la utilización de la fibra óptica como medio de transmisión, y de divisores ópticos para la difusión y concentración de información, las redes PON permiten alcanzar velocidades de hasta 2,5 Gbps para transmisión y recepción de información, a usuarios situados a 60 km de la central.

En la figura 12 se muestra un gráfico representativo del funcionamiento global de una red PON aplicada a FTTH [8].

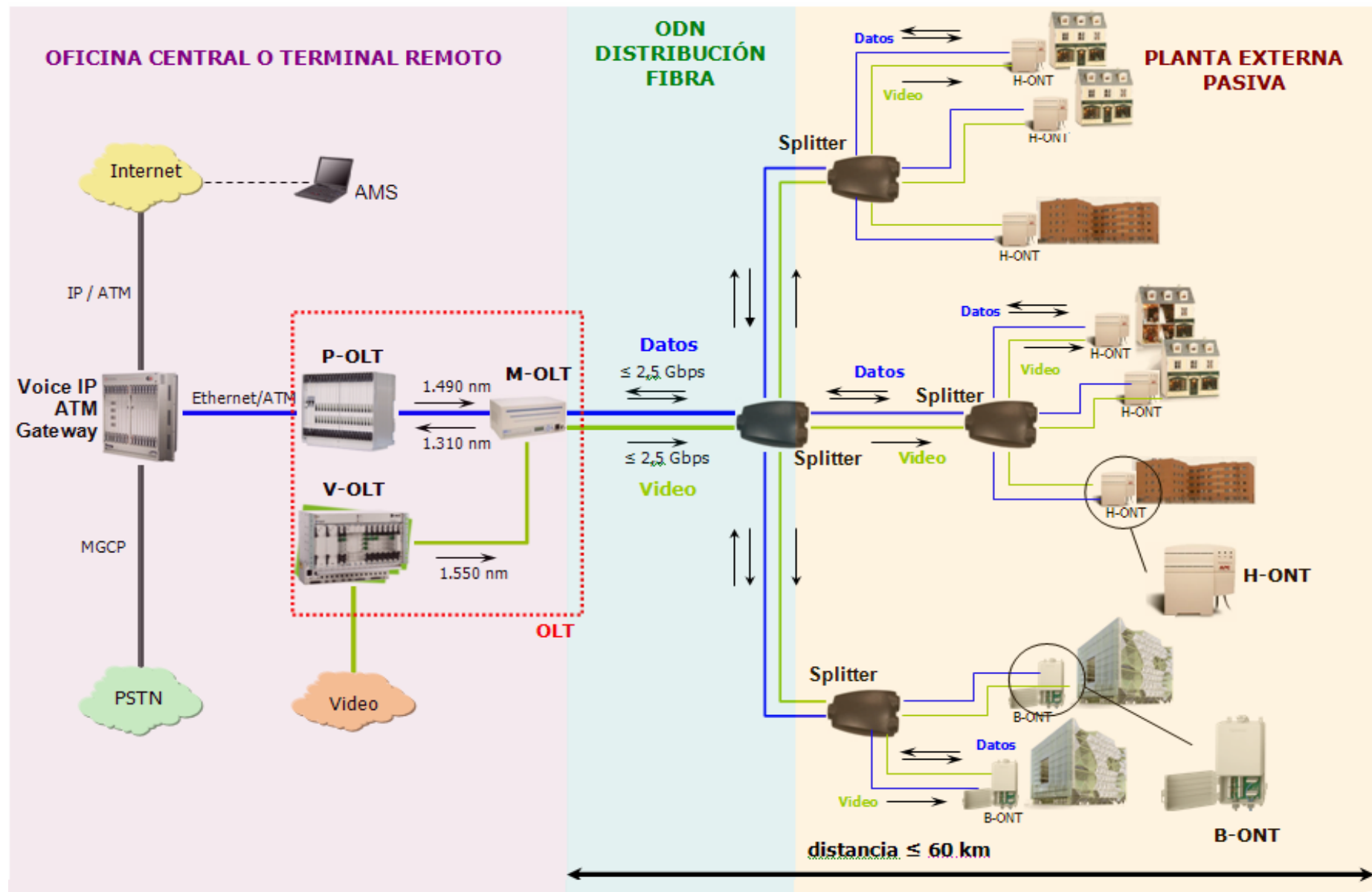


Figura 12: Funcionamiento general de una red PON para FTTH

2.4. Ventajas e inconvenientes de las redes PON

Para comprender por qué la arquitectura FTTH se basa una red PON, es necesario realizar una comparativa directa entre las redes punto a punto pasiva, punto a multipunto pasiva y punto a multipunto activas.

A continuación, se muestra una tabla comparativa con las ventajas e inconvenientes de cada uno de los tres tipos de configuración de red citados anteriormente, y que claramente justifican la utilización de redes PON sobre FTTH frente al resto de configuraciones [5].

Tipo de Red	Aspectos Positivos	Aspectos Negativos
Punto a Punto	<ul style="list-style-type: none"> Alta Capacidad 	<ul style="list-style-type: none"> Alto Coste de Despliegue
Estrella Activa	<ul style="list-style-type: none"> Alta Capacidad 	<ul style="list-style-type: none"> Alto Coste de Despliegue Alto Coste de Operación y Mantenimiento
Punto a Multipunto (PON)	<ul style="list-style-type: none"> Alta Capacidad Utilización de elementos pasivos (reducción de la inversión) Bajo Coste de Operación y Mantenimiento Flexibilidad y Escalado Todos los servicios en una fibra Estandarización ITU G.983.3 	<ul style="list-style-type: none"> Requerimiento de métodos de protección contra sabotajes Alto impacto en averías de central OLT

Figura 13: Tabla comparativa de los diferentes tipos de redes

Tal y como se puede observar en la tabla adjunta, las redes PON son las más adecuadas a la hora de diseñar una arquitectura física de red para los despliegues FTTH. El hecho de no tener líneas expresamente dedicadas por usuario hasta la centralita del operador (donde se encuentra el OLT), reducen de forma considerable el coste de despliegue inicial de la red. Este es el caso de las redes punto a punto, que a pesar de otorgar un elevado ancho de banda por usuario, no compensa dado su elevado coste de despliegue.

En cuanto a las redes activas, la inclusión de elementos activos incrementa no sólo el coste de despliegue de la propia red, sino también el de operación y mantenimiento de la misma, obligando a gestionarla y centralizarla a nivel software y hardware. Las redes PON, reducen estos costes innecesarios.

En conclusión, la utilización de arquitecturas PON supone grandes ventajas a la hora del diseño, de la instalación y del mantenimiento posterior de la red.

2.4.1. Principales ventajas de las redes PON

Muchas de las propiedades de las redes PON vienen dadas por la utilización de fibra, y por supuesto, de los elementos pasivos que la componen, que sumados a la configuración específica de estrella o árbol, le otorgan ciertas ventajas frente a otras topologías. Esto otorga a las redes PON dos ventajas indiscutiblemente importantes: el ahorro de costes en implantación y la capacidad y ancho de banda de las redes ópticas pasivas.

Sin embargo estas ventajas no son las únicas, y entre las más relevantes se encuentran las que se enumeran a continuación [2]:

- El propio hecho de utilizar fibra óptica en la red, permite la reutilización de fibra existente en muchos emplazamientos, así como realizar tendidos aéreos, que reducen el coste de despliegue en torno a un 50%. En aquellas zonas no cubiertas por fibra con anterioridad, el ahorro de fibra es menos importante, aunque supone un ahorro de cara al futuro.
- La propia estructura PON, permite un ahorro en la instalación de nodos y puertos ópticos en las centrales telefónicas (OLT), dada la posibilidad de escalar información (señales) en función de la demanda solicitada por los usuarios.
- Existe la posibilidad de suministrar cada información en una longitud de onda diferente, evitando la mezcla de señales entre sí, y facilitando la difusión desde la OLT a los diferentes ONT. De esta forma, las señales de voz y datos se gestionan a través del denominado P-OLT, que funciona en longitud de onda de segunda ventana; y las señales de video en difusión se gestionan a través del llamado V-OLT, que funciona en longitud de onda de tercera ventana y con uso de cabeceras existentes. Este hecho, otorga escalabilidad al sistema de transmisión PON, dada la variedad de longitudes de onda a utilizar por el mismo a través de CWDM/DWDM.
- A esto, debemos sumarle la reducción del coste de despliegue de la red en planta externa. El uso de elementos pasivos en la red, supone intrínsecamente una reducción del coste de implantación. Por un lado reducimos el coste que supone la instalación de elementos activos; y por otro, el coste del propio elemento pasivo, que es mucho menor.
- La instalación de redes PON a partir de estos elementos es mucho más económica, y evita costes de operación y mantenimiento, tales como la inexistencia de caídas o mantenimiento de alimentaciones de la red.
- Por último, cabe destacar el elevado ancho de banda permitido por los sistemas basados en arquitecturas PON, que puede llegar a alcanzar los 2,5 Gbps de tasa descendente para el usuario. La necesidad de aumentar el ancho de banda y la velocidad en nuestros días no es más que otra justificación para la utilización de redes PON. Esto supone un soporte imprescindible para

prestar servicios tales como video de alta definición HD Video a 10Mbps; los servicios denominados “bajo demanda”; o los nuevos servicios promovidos por las nuevas redes NGN⁽¹⁾ o IMS⁽²⁾ [6].

2.4.2. Principales inconvenientes de las redes PON

A pesar de la gran cantidad de ventajas que poseen las redes PON intrínsecas a su propia configuración, también existen algunos inconvenientes derivados de la misma. Sin embargo, no son lo suficientemente importantes como para evitar escoger las redes PON como la mejor configuración posible para una red FTTH.

Uno de los primeros inconvenientes a tener en cuenta es el causado por la distribución de información desde el OLT hasta los diferentes ONTs. El hecho que un divisor distribuya la información procedente del OLT a todos los ONTs que se encuentran conectados a la misma etapa o árbol de distribución, provoca una reducción en la eficiencia de la red.

La capacidad del tronco del árbol se ve dividida en tantos ONT existan conectados al divisor, por lo que la eficiencia del canal es menor que en un enlace punto a multipunto. Además, debido a que PON posee una velocidad prefijada, obliga a trabajar a la red a dicha velocidad pero suministrando servicios al cliente a velocidades diferentes. Así por ejemplo, una ONT suministrando 100 Mbps al cliente, está obligada a trabajar a tasas de velocidad superiores: 1,25 Gbps ó 2,5 Gbps [8].

Además, el hecho que toda la información fluya por el mismo canal físico, aumenta la probabilidad de escuchas en la red, perdiendo seguridad, y obligando a establecer un alto nivel de encriptación.

En relación con la seguridad, la arquitectura PON es sensible a los sabotajes externos. Este inconveniente, viene dado por la naturaleza del propio medio de transmisión. La inyección de luz constante a una longitud de onda determinada, enmascara toda la comunicación y el servicio tiende a caerse.

Otro aspecto importante es el hecho de que una etapa, o árbol de distribución, dependa exclusivamente de un solo OLT. Una avería en el OLT de cabecera, supone un alto impacto en la red, puesto que todos los ONT y divisores conectados al mismo se ven afectados. Sin embargo, la instalación de pocos OLT supone una reducción del coste de despliegue de red bastante considerable.

(1): NGN es un modelo de arquitectura de redes de referencia que debe permitir desarrollar toda la gama de servicios IP multimedia de nueva generación (comunicaciones VoIP nueva generación, videocomunicación, mensajerías integradas multimedia, integración con servicios IPTV, domótica, etc...) así como la evolución, migración en términos más o menos de sustitución o emulación de los actuales servicios de telecomunicación.

(2): IMS “IP Multimedia Subsistema”, es el subsistema de control, acceso y ejecución de servicios común y estándar para todas las aplicaciones en el modelo de arquitectura de nueva generación (NGN), capa de control de una red de nueva generación. IMS permite controlar de forma centralizada y deslocalizada el diálogo con los terminales de los clientes para la prestación de cualquiera de los servicios (voz, datos, video, etc.) que estos requieran.

Las ONT de la red PON, son bastante sensibles a las caídas de nivel, y en muchos casos, el presupuesto de potencia de la red es bastante limitado. Dicho presupuesto, está directamente relacionado con:

- La capacidad de los divisores. A mayor número de usuarios, menos potencia llegará a cada uno desde el OLT.
- La distancia máxima a alcanzar. Cuanto mayor sea la distancia entre el OLT y los usuarios finales, menos potencia llegará a los ONTs correspondientes.

Además, cada propio divisor, introduce atenuación en la línea. Por lo tanto a mayor número de etapas o saltos de divisor, mayor pérdida se introduce en el canal. Así pues, la atenuación producida por un divisor atiende a la siguiente razón matemática [2]:

$$\text{Atenuación}_{\text{DIVISOR}} = 10 \log \frac{1}{N} \text{ (dB)}, \text{ donde } N \text{ es el número de puertos del divisor.}$$

Por ejemplo, para un divisor óptico de 24 puertos de salida (divisor 1:16), la atenuación introducida en el canal sería de:

$$\text{Atenuación}_{1:16} = 10 \log \frac{1}{16} = 12 \text{ dB}$$

Sin embargo, y a pesar de los inconvenientes citados anteriormente, la configuración con más ventajas para el despliegue de las redes FTTH es PON. Dos de los condicionantes más importantes que justifican la utilización de esta arquitectura son:

- El ahorro económico que supone el desplegar las redes PON respecto a las otras dos configuraciones (punto a punto y estrella activa).
- La flexibilidad de la red, que permite la utilización de un mismo canal por un gran número de usuarios.

2.5. Estándares de redes PON

Las redes PON, constituyen una familia de redes (xPON), cuyo origen se encuentra en una primera red que fue definida por la FSAN, grupo formado por 7 operadores de telecomunicaciones, con el objetivo de unificar las especificaciones para el acceso de banda ancha a las viviendas. A continuación se muestra una evolución de los estándares de redes PON desde su aparición.

2.5.1. Estándar APON: ITU-T G.983.1

FSAN [11] estandarizó un punto inicial de PON, cuya transmisión en canal descendente estaba basada en ráfagas de celdas ATM (*Asynchronous Transfer Mode* o modo de transferencia asíncrono), con una tasa máxima de velocidad de 155 Mbps, que se reparte entre el número de ONTs que estén conectadas en la red, y de forma no equitativa. A cada celda ATM se le introducían dos celdas más (PLOAM), encargadas de indicar el destinatario de cada celda y para el mantenimiento. Estas redes se denominan **APON** (*ATM Passive Optical Network*), y se encuentran estandarizadas bajo la norma ITU-T G.983.x (ed. 1998).

2.5.2. Estándar BPON: ITU-T G.983.x

Bajo esta misma norma, ITU-T G.983.x (ed. 2005) [12] [13], también surgió la denominada **BPON** (*Broadband PON* o red óptica pasiva de banda ancha). Surgen como evolución de las redes APON, dada la limitación de velocidad de las mismas.

Las redes BPON, también se basan en transmisión de celdas ATM, pero tienen la diferencia respecto de las redes APON que pueden dar soporte a otros estándares de banda ancha. En su primera versión, las redes BPON estaban definidas bajo una tasa fija de transmisión de 155 Mbps, tanto para el canal ascendente como para el descendente. Sin embargo, más adelante se modificó para flexibilizarla, admitiendo canales asimétricos:

- Canal descendente: 622 Mbps.
- Canal ascendente: 155 Mbps.

Sin embargo, y a pesar de presentar mejoras respecto a las redes APON, tenían un elevado coste de implantación, así como diversas limitaciones técnicas. De esta forma, se ha ido avanzando poco a poco para solventar los problemas que suponía esta tecnología que, a día de hoy, permite de forma asimétrica alcanzar velocidades de hasta 1.2 Gbps de la siguiente forma:

- Canal descendente: 1,244 Gbps.
- Canal ascendente: 622 Mbps.

Por otra lado, a parte de admitir diversas velocidades de transmisión, permite caudalizar el canal descendente y el ascendente bajo 1 o 2 fibras monomodo (según norma ITU-T G.652) [14], con un alcance máximo de 20 km entre divisor óptico y ONT, y entre ONTs de misma etapa.

Las longitudes de onda de trabajo que establece el estándar BPON, varían en función de si se utilizan 1 o 2 fibras por cada ONT, aunque para ambos establece una longitud de onda dedicada para la difusión de vídeo desde el OLT hasta los ONT, siendo ésta diferente de las utilizadas en la transmisión de voz y datos. Las longitudes de onda son:

- Para 1 fibra por cada ONT, compartida para la transmisión y la recepción:
 - Canal descendente: $\lambda=1480-1500$ nm
 - Canal ascendente: $\lambda=1260-1360$ nm
 - Video: $\lambda=1550-1560$ nm
- Para 2 fibras por cada ONT, una para transmisión y otra para recepción:
 - Canal descendente: $\lambda=1260-1360$ nm
 - Canal ascendente: $\lambda=1260-1360$ nm
 - Video: $\lambda=1550-1560$ nm

Las redes BPON, admiten un ratio máximo de 32 divisores por OLT, y cada divisor, admite un máximo de 64 salidas a usuarios ONT. Esto supone un total de:

$$\text{Usuarios}_{\text{máximos}} = 32 \frac{\text{divisores}}{\text{OLT}} \cdot 64 \frac{\text{usuarios}}{\text{divisor}} = 2.048 \text{ usuarios/OLT}$$

2.5.3. Estándar EPON: IEEE 802.3ah

Paralelamente a la evolución de las redes PON estandarizadas por la ITU, y que tienen su origen en la FSAN, surge una nueva especificación realizada por el grupo de trabajo EFM (*Ehternet in the First Mile* o Ethernet en última milla), constituido por la IEEE. La intención del EFM en este sentido, era la de aprovechar las ventajas de las características de la tecnología de fibra óptica en redes PON, y aplicarlas a Ethernet. De esta forma, crearon el estándar **EPON** (Ehternet PON) bajo la norma IEEE 802.3ah (ed. 2004) [15], y a día de hoy se encuentra en desarrollo.

La arquitectura de una red EPON, se basa en el transporte de tráfico Ethernet, pero manteniendo las características de la especificación IEEE 802.3, y por tanto deja a un lado la transmisión de celdas ATM, sobre la que se basan los estándares APON y BPON, y encapsula la información sobre tramas Ethernet. Este hecho, permite dotar a EPON de ciertas ventajas respecto a los estándares de APON y BPON, que son las siguientes:

- Permite trabajar directamente a velocidades de Gbps, al ir soportado sobre Ethernet. Este caudal no es monousuario, puesto que ha de repartirse entre tantos usuarios (ONT) como tenga el sistema.
- La interconexión entre islas o etapas EPON es más simple.
- Se reducen ciertos costes derivados de la utilización de elementos ATM y SDH, propio de las redes anteriores.

En cuanto a velocidades de transmisión se refiere, EPON establece un régimen de línea a 1.244 Mbps simétrico, tanto para el canal descendente como para el ascendente.

El régimen de transmisión de trama, se sitúa en un máximo de 1000 Mbps simétrico también.

Cabe destacar, que la estandarización sólo permite caudalizar el canal descendente y el ascendente bajo 1 sola fibra monomodo (según norma ITU-T G.652), con un alcance máximo de 10 km entre divisor y ONT, y entre ONTs de misma etapa (existe la previsión de ampliar la distancia a 20 km en ambos casos).

El estándar EPON establece una longitud de onda dedicada para la difusión de vídeo desde el OLT hasta los ONT al igual que el estándar BPON, siendo ésta diferente de las utilizadas en la transmisión de voz y datos. Las longitudes de onda son:

- Canal descendente: $\lambda=1480\text{-}1500\text{ nm}$
- Canal ascendente: $\lambda=1260\text{-}1360\text{ nm}$
- Video: $\lambda=1550\text{-}1560\text{ nm}$

Las redes EPON admiten un ratio máximo de 16 divisores por OLT, y cada divisor admite un máximo de 64 salidas a usuarios ONT. Esto supone un total de:

$$\text{Usuarios}_{\text{máximos}} = 16 \frac{\text{divisores}}{\text{OLT}} \cdot 64 \frac{\text{usuarios}}{\text{divisor}} = 1.024 \text{ usuarios/OLT}$$

En este caso, el estándar admite menos número de usuarios ONT conectados y en servicio a un mismo OLT respecto del estándar BPON. Exactamente, la diferencia entre uno y otro sería la siguiente:

$$\frac{\text{Usuarios}_{\text{máximos}}|_{\text{BPON}} = 2.048 \text{ usuarios/OLT}}{\text{Usuarios}_{\text{máximos}}|_{\text{EPON}} = 1.024 \text{ usuarios/OLT}} = 2 \text{ veces más usuarios BPON respecto EPON}$$

Sin embargo, y a pesar que el estándar EPON implique reducir a la mitad el número de ONTs conectados a un mismo OLT, el ratio de la velocidad se ve incrementado en la misma proporción, considerando BPON en su configuración básica, tal y como se muestra a continuación:

$$\frac{\text{Ratio}_{\text{EPON}} = 1244 \text{ Mbps}}{\text{Ratio}_{\text{BPON}} = 622 \text{ Mbps}} = 2 \text{ veces más velocidad EPON respecto BPON.}$$

Por último, cabe destacar de que a pesar de ser EPON un estándar que permite una mayor velocidad que BPON, no es sin embargo de mayor alcance, puesto que la cota de distancia máxima entre el OLT de cabecera y los ONTs respectivos, guardan la siguiente proporción:

$$\frac{\text{Distancia}_{BPON} = 20 \text{ kms}}{\text{Distancia}_{EPON} = 10 \text{ kms}} = 2 \text{ veces más distancia BPON respecto EPON}$$

2.5.4. Estándar GPON: ITU-T G.984.x

A día de hoy, el estándar más avanzando sobre el que se sigue aún trabajando es el nacido a partir de la evolución de las redes BPON. Se denomina **GPON** (Gigabit PON) y se encuentra estandarizado bajo la norma ITU-T G.984.x [16] [17] [18] [19].

GPON permite transmisión de información encapsulada bajo dos tecnologías:

- ATM, exactamente igual que en el caso del estándar BPON, pero mejorada.
- Ethernet o TDM, usando para ello el GEM (*GPON Encapsulation Mode* o modo encapsulado GPON) basado en GFP (*Generic Framing Procedure*) o dual.

Las mejoras que ofrece GPON respecto de todos los estándares anteriores a él es, de forma general, aumentar el ancho de banda en transmisión, y aportar seguridad a la propia red a nivel de protocolo.

Así pues, GPON permite tasas de transmisión muy variadas, que se encuentran en el rango de entre los 622 Mbps, (como su antecesor BPON), hasta los 2,488 Gbps en el canal descendente. Al igual que BPON, este estándar permite tanto la transmisión de datos simétrica como asimétrica, cuyas tasas de transmisión, para cada una de ellas son:

- Transmisión simétrica: caudales de entre 622 Mbps y 2,488 Gbps para canal descendente y ascendente.
- Transmisión asimétrica: caudales diferentes para el canal descendente y ascendente:
 - Canal descendente hasta: 2,488 Gbps
 - Canal ascendente hasta: 1,244 Gbps

El hecho de permitir un ancho de banda tan sumamente elevado, permite la transmisión de prácticamente cualquier información multimedia y soportar cualquier servicio de operador. Además, dado su origen de transferencia multisoporte (ya sea vía ATM o vía Ethernet y TDM), le configura como soporte global multiservicio:

- Transmisión de voz.
- Ethernet 10/100 Base-T.
- Servicio ATM.
- Etc.

Cabe destacar que la estandarización permite caudalizar el canal descendente y el ascendente bajo 1 o 2 fibras monomodo (según norma ITU-T G.652), con un alcance máximo de 60 km entre divisor y ONT, y de 20 km entre ONTs de misma etapa.

Las longitudes de onda de trabajo que establece el estándar GPON varían en función de si se utilizan 1 o 2 fibras por cada ONT, aunque para ambos establece una longitud de onda dedicada para la difusión de vídeo desde el OLT hasta los ONT, siendo ésta diferente de las utilizadas en la transmisión de voz y datos. Las longitudes de onda son:

- Para 1 fibra por cada ONT, compartida para la transmisión y la recepción:
 - Canal descendente: $\lambda=1480-1500$ nm
 - Canal ascendente: $\lambda=1260-1360$ nm
 - Vídeo: $\lambda=1550$ nm
- Para 2 fibras por cada ONT, una para transmisión y otra para recepción:
 - Canal descendente: $\lambda=1260-1360$ nm
 - Canal ascendente: $\lambda=1260-1360$ nm
 - Vídeo: $\lambda=1550$ nm

Las redes GPON, admiten un ratio máximo de 128 divisores ópticos por OLT, y cada divisor, admite un máximo de 64 salidas a usuarios ONT. Esto supone un total de:

$$\text{Usuarios}_{\text{máximos}} = 128 \frac{\text{divisores}}{\text{OLT}} \cdot 64 \frac{\text{usuarios}}{\text{divisor}} = 8.192 \text{ usuarios/OLT}$$

Comparativamente, el estándar GPON permite aumentar de forma considerable el número de ONTs conectadas a un mismo OLT de cabecera. La proporción respecto a los estándares BPON y EPON es la siguiente:

$$\frac{\text{Usuarios}_{\text{máximos}}|_{\text{GPON}} = 8.192 \text{ usuarios/OLT}}{\text{Usuarios}_{\text{máximos}}|_{\text{EBON}} = 2.048 \text{ usuarios/OLT}} = 4 \text{ veces más usuarios GPON respecto BPON}$$

$$\frac{\text{Usuarios}_{\text{máximos}}|_{\text{GPON}} = 8.192 \text{ usuarios/OLT}}{\text{Usuarios}_{\text{máximos}}|_{\text{EBON}} = 1.024 \text{ usuarios/OLT}} = 8 \text{ veces más usuarios GPON respecto EPON}$$

La diferencia, tal y como se puede comprobar, es notoria entre unos estándares y otros, lo que lleva a pensar que la tecnología GPON permite minimizar el coste de despliegue, dado que necesitaremos instalar menos número de OLT para dar cobertura a una misma zona determinada.

En cuanto al ratio de transmisión, GPON también aumenta la velocidad de transferencia de datos, siendo esta proporción entre los tres estándares, la siguiente:

$$\frac{\text{Ratio}_{GPON} = 2488 \text{ Mbps}}{\text{Ratio}_{BPON} = 622 \text{ Mbps}} = 4 \text{ veces más velocidad GPON respecto BPON}$$

$$\frac{\text{Ratio}_{GPON} = 2488 \text{ Mbps}}{\text{Ratio}_{EPON} = 1244 \text{ Mbps}} = 2 \text{ veces más velocidad GPON respecto EPON}$$

No sólo permite transferir datos a mayor velocidad, sino que también ofrece mayor fiabilidad dado que dispone de seguridad en la transmisión a nivel de protocolo, introduciendo campos en las tramas ATM/Ethernet encargado de esta misión.

Por último, es destacable el aumento en la distancia entre el OLT de cabecera y los diferentes ONT de los usuarios, que se ve considerablemente incrementado, a razón de la siguiente proporción:

$$\frac{\text{Distancia}_{GPON} = 60 \text{ kms}}{\text{Distancia}_{BPON} = 20 \text{ kms}} = 3 \text{ veces más distancia GPON respecto BPON}$$

$$\frac{\text{Distancia}_{GPON} = 60 \text{ kms}}{\text{Distancia}_{EPON} = 10 \text{ kms}} = 6 \text{ veces más distancia GPON respecto EPON}$$

Concluyendo la comparativa analítica de datos entre unos estándares y otros, se puede definir el estándar GPON como un estándar hasta 4 veces más rápido, permitiendo hasta 6 veces más distancia entre OLT y ONTs, y admitiendo hasta 8 veces más usuarios que los otros estándares APON, BPON y EPON.

2.5.5. Síntesis comparativa entre estándares xPON

En los apartados anteriores, se ha realizado una analítica comparativa entre datos ofrecidos por los diferentes estándares xPON más avanzados. Si bien, estos datos se pueden condensar y completar en la siguiente tabla de estándares [12] [15] [16].

CARACTERÍSTICA	BPON	EPON	GPON
Estándar	ITU-T G.983.x[IEEE 802.2ah	ITU-T G.984.x
Velocidades de Transmisión (Mbps)	Down: 155, 622, 1244 Up: 155, 622 Mbps	Down: 1244 Down: 1244	Down: 1244, 2488 Up: 155, 622, 1244, 2488
Tipo de Fibra	Monomodo (ITU-T G.652)	Monomodo (ITU-T G.652)	Monomodo (ITU-T G.652)
Número de Fibras por ONT	1 ó 2	1	1 ó 2
Longitudes de onda de funcionamiento	Para 1 Fibra: <ul style="list-style-type: none"> Down: 1480-1500 nm Up: 1260-1360 nm Video: 1550 nm Para 2 Fibras: <ul style="list-style-type: none"> Down: 1260-1360 nm Up: 1260-1360 nm Video: 1550-1560 nm 	<ul style="list-style-type: none"> Down: 1480-1500 nm Up: 1260-1460 nm Video: 1550-560 nm 	Para 1 Fibra: <ul style="list-style-type: none"> Down: 1480-1500 nm Up: 1260-1360 nm Video: 1550-1560 nm Para 2 Fibras: <ul style="list-style-type: none"> Down: 1260-1360 nm Up: 1260-1360 nm Video: 1550-1560 nm
Nº máximo splitters por OLT	32	16	128
Alcance Máximo Entre OLT-ONT	20 km	10 (prev. 20) km	60 km
Distancia máxima entre ONTs	20 km	10 (prev. 20) km	20 km
Pérdidas de inserción máxima	0 dB	15/20 dB	15/20/25 dB
Modo de Tráfico entre OLT y ONT	ATM	Ethernet	ATM, Ethernet, TDM
Arquitectura de transmisión	Asimétrica, Simétrica	Ethernet (simétrica)	Asimétrica, Simétrica
Ráfaga		Laser ON/OFF: 512 ns Conf. AGC y CDR: 400 ns	Guarda: 25.6 ns Preámbulo: 35.2 ns

Figura 14: Tabla comparativa entre estándares xPON

2.6. Sistemas de transmisión basados en GPON

Las redes PON más avanzadas en cuanto a tecnología se refiere, y que mejores prestaciones aportan al sistema de transmisión, son las redes GPON, tal y como se ha podido comprobar en el apartado anterior.

A pesar de haber sacado una primera versión del estándar de la ITU-T, aún sigue en desarrollo y no ha sido completado todavía. Sin embargo, dada la relevancia de este tipo de redes, es conveniente realizar un estudio particularizado de las mismas, puesto que los futuros despliegues estarán basados en esta tecnología.

La normativa ITU-T G.984.x, establece en sus diferentes variantes ciertos requerimientos mínimos que deben cumplir las redes GPON a diferentes niveles. En general, la diferente normativa establece lo siguiente:

- ♦ **G.984.1 – Requerimientos mínimos de servicio**

Esta normativa [16] hace referencia a los requisitos mínimos para otorgar un servicio GPON, y que ya se ha detallado en el apartado anterior. Especifica todas las configuraciones de la velocidad de la línea, así como la capacidad del servicio.

- ♦ **G.984.2 – Requerimientos del medio físico**

Esta normativa [17] hace referencia a la especificación de las características mínimas que debe cumplir el transceptor. Estas especificaciones vienen determinadas por la velocidad de la línea y por la clase de ODN. Además, incluye un campo de cabecera que controla la cantidad de información a enviar para cada velocidad del upstream, y se denomina *burst overhead* o cabecera de la ráfaga de datos.

- ♦ **G.984.3 – Requerimientos de convergencia**

Esta normativa [18] especifica los diferentes protocolos de convergencia en transmisión de datos y video, la capa física de operación y mantenimiento (O&M), y los diferentes mecanismos de ranking o alineación.

- ♦ **G.984.4 – Requerimientos de gestión**

Esta normativa [19] hace referencia a los requerimientos de gestión e interfaz de manejo del ONT. Esta gestión está basada en la denominada OMCI (*ONT Management and Control Interface*) del modo BPON, pero particularizada para la transmisión de paquetes GPON.

A continuación, se detallaran algunas particularizaciones importantes del estándar GPON, que no han sido destacadas en el apartado anterior, y que son necesarios para conocer las posibilidades que otorga esta configuración.

2.6.1. Arquitectura y configuración

A la arquitectura general de una red óptica pasiva, el estándar GPON establece algunas particularidades respecto a los extremos de línea, tanto en usuario como en cabecera.

Así pues, determina los interfaces, a nivel de protocolo, de inicio y final de línea, una vez traspasado el ONT y el OLT respectivamente: UNI (*User Network Interface*), interfaz de red de usuario, y el SIN (*Services Network Interface*), interfaz de red de servicios [19].

- **UNI** (*User Network Interface*); es el interfaz de usuario final, y se encuentra tras el ONT. Establece los interfaces de transmisión más comunes, tales como: Ethernet 10Base-T, 100Base-T, 1000Base-T, ATM, E1 y E3.

No todos los ONT se encuentran preparados para transmitir al usuario final a través de los interfaces citados anteriormente. Por ello, existe un bloque anexo al ONT denominado AF (*Adaptation Function*) o función de adaptación, y que permite la transmisión de datos en el interfaz adecuado entre el usuario y el ONT.

- **SNI** (*Services Network Interface*); es el interfaz de servicio final, y se encuentra tras el OLT. Establece los interfaces de transmisión al OLT más comunes, tales como: Ethernet 1000Base-X, POTS, ATM, E1 y E3.

Todos los OLT se fabrican preparados para establecer un interfaz de servicio de cabecera de red preparado para la transmisión de voz, datos y video acorde con el establecido con el usuario final.

Gráficamente, se puede representar de forma esquemática según se muestra en la figura 15:

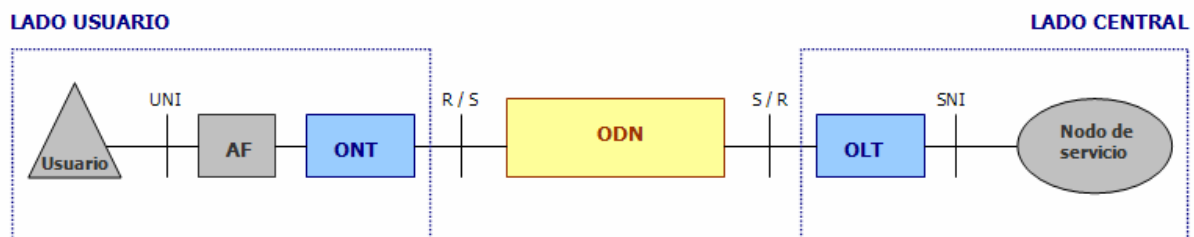


Figura 15: Interfaces GPON ITU-T G.984.2

Por otra parte, el estándar establece diferentes configuraciones de red, relacionadas con la protección de la misma. Así pues, se puede introducir redundancia en la arquitectura de transmisión, duplicando la fibra de transporte entre el OLT y el divisor de cabecera. Incluso, esta redundancia se puede extrapolar a planta externa, entre los divisores y los ONTs, mallando la red aun más.

Así pues, la red puede tener tres tipos de configuraciones determinadas:

- **Configuración Básica.** Está constituida por una fibra de conexión entre el divisor de cabecera y el OLT. Además, la conexión entre los diferentes divisores de etapa y sus ONT correspondientes, se realizan a través de un enlace monofibra. Esta configuración requiere técnicas WDM [17].

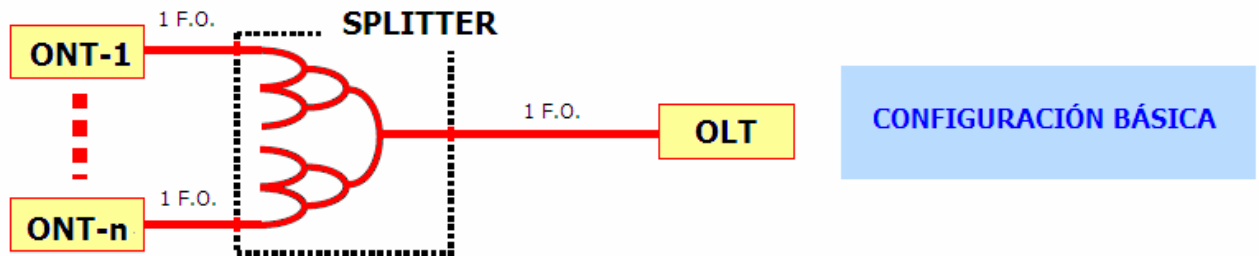


Figura 16: Configuración básica de red GPON

- Diversificación OLT.** Esta configuración, establece un enlace de dos fibras entre el divisor de cabecera y el OLT. La conexión entre los divisores de etapa y los ONT se realizan a través de enlace monofibra. Con esta configuración, no es necesaria la utilización de WDM, ya que la información de cada canal (ascendente y descendente) viajan a través de una fibra óptica dedicada [17].

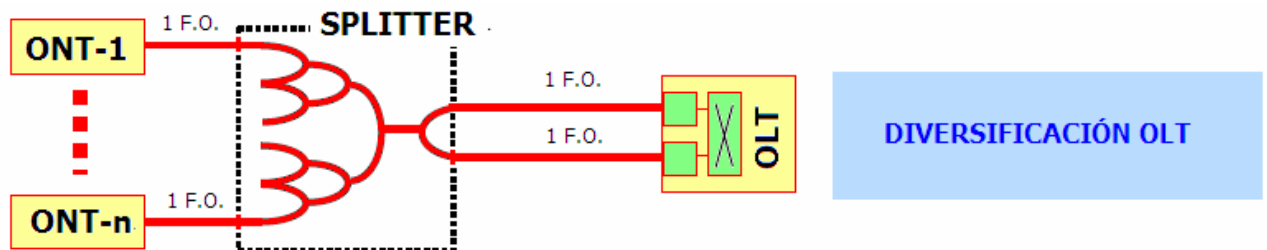


Figura 17: Configuración de diversificación OLT en red GPON

- Diversificación Total.** Con esta configuración, se establece, además de un enlace de dos fibras entre el divisor de cabecera y el OLT, una conexión bifibra entre los diferentes divisores de etapa y los ONT, mallando la red de unos divisores a otros, y diversificando la señal de unos divisores a otros (antes independientes entre si) [17].

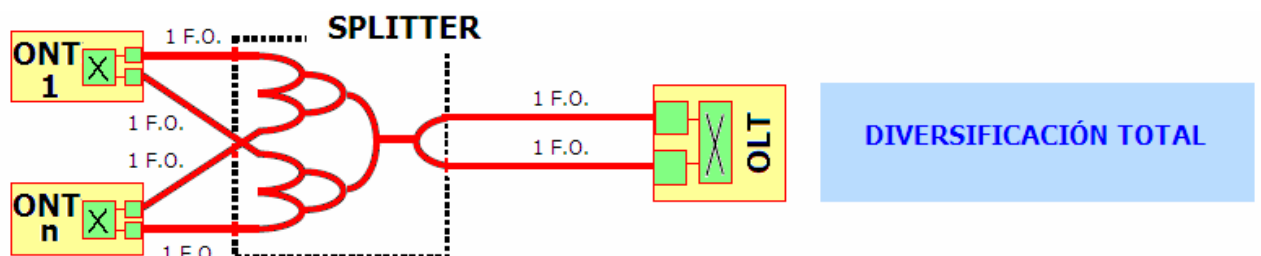


Figura 18: Configuración de diversificación total en red GPON

2.6.2. Capa Física GPON

La normativa ITU-T G.984.1 [16] y G.984.2 [17] establecen la velocidad y capacidad de la línea en cada sistema, así como los requerimientos del medio físico necesario para otorgar dicho servicio.

Tal y como ya se comentó en el apartado de estándares anterior, el sistema GPON permite transmisión bajo una fibra, o bajo dos fibras ópticas en el enlace OLT-ONT. En función de una u otra configuración, el funcionamiento en bandas ópticas es diferente. Así pues, las bandas de transmisión en longitud de onda para cada canal (ascendente y descendente), son las definidas en el siguiente cuadro:

TRANSMISIÓN	UPSTREAM	DOWNSTREAM
1 FIBRA	1260 – 1360 nm	1480 – 1500 nm
2 FIBRAS	1260 – 1360 nm	1260 – 1360 nm

Figura 19: Tabla de longitudes de onda para la capa física GPON

Esta transmisión, también según la normativa G.984.2, debe realizarse bajo fibra monomodo optimizada para 2ª ventana, según se especifica en la normativa ITU-T G.652 [20] para este canal de transmisión. La transmisión en 2ª ventana es aquella banda de longitudes de onda con un máximo en 1310 nm, y comprendida entre 1190 – 1390 nm.

Para la transmisión de luz, el estándar también fija un código de línea determinado, siendo éste el **NRZ** o sin retorno a cero (*Non Return to Zero*) pseudoaleatorizado. La señal binaria es codificada usando pulsos rectangulares, que no son más que amplitudes modulares con código determinado. La señal fluctúa entre +1 y -1 en función de si hay luz o no (bit=1, bit=0), tal y como se representa en figura 20:

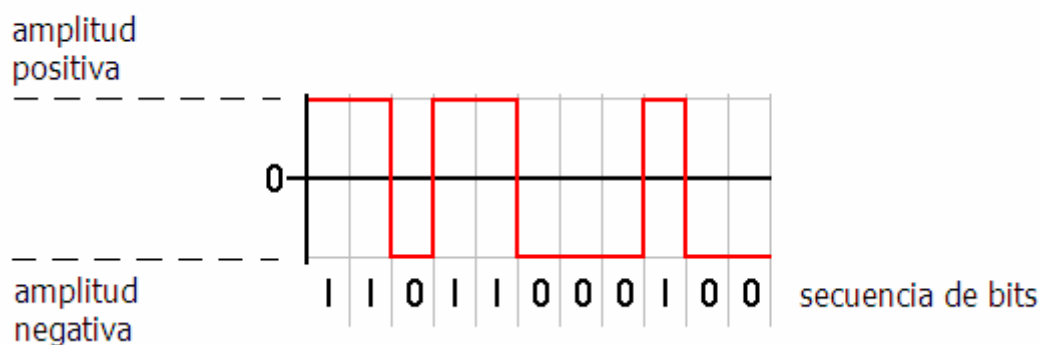


Figura 20: Código de línea NRZ

En cuanto al número de saltos y divisores ópticos permitidos por la red, el estándar G.984.2 establece un máximo de hasta 128 divisores por cada OLT de cabecera. Además, la normativa incluye una serie de divisores genéricos, siendo estos: 1:16, 1:32 y 1:64.

Analíticamente, implica que por cada OLT de cabecera instalado, se puede prestar servicio con garantía de prestaciones a un total de 8.192 ONT. Esta cifra procede de la multiplicación del número máximo de divisores admitidos por el número de salidas de cada divisor. El cálculo sería el siguiente:

$$\text{Usuarios}_{\text{máximos}} = 128 \frac{\text{divisores}}{\text{OLT}} \cdot 64 \frac{\text{usuarios}}{\text{divisor}} = 8.192 \text{ usuarios/OLT}$$

El beneficio de esta red, consiste en la reducción de instalación de nodos OLT (equipo activo) aumentando el número de divisores (elemento pasivo), que son considerablemente más económicos, y por tanto, reduciendo el coste global de despliegue de la red GPON.

El número de divisores instalados, por otra parte, influye en las pérdidas por atenuación de la red. Estos elementos, introducen un nivel de pérdidas en la red que, sumado a los de otros elementos pasivos y a las pérdidas de la propia fibra óptica, suponen un nivel global de pérdidas que permiten clasificar la red GPON en 3, en función de su calidad. Así pues, existen tres tipos de redes GPON en función de su calidad, asociadas a un rango de pérdidas determinado entre el OLT de cabecera y el ONT de usuario final. Son las que se detallan en la siguiente tabla:

TIPO DE ODN	CALIDAD	MARGEN DE PÉRDIDAS
A	Excelente	5 – 20 dB
B	Muy Buena	10 – 25 dB
C	Buena	15 – 30 dB

Figura 21: *Tipología de redes GPON en función de la calidad*

La calidad, se encuentra directamente asociada a dos parámetros muy importante de la red, que también establece la normativa G.984.2, y son la capacidad nominal de la red, y la distancia máxima de enlace.

Así pues, se establece una serie de conjuntos de velocidad, asociados a un canal determinado (ascendente y descendente). Independientemente de la capacidad final de la red, el usuario final puede disfrutar de diversas velocidades, sin necesidad de tener que contratar el máximo de velocidad ofrecido por la red.

Estas velocidades se encuentran intrínsecamente relacionadas con la calidad del ODN de la red. Así pues, para ofrecer ciertas cotas de capacidad, es necesario tener un tipo de ODN mínimo determinado. No es factible, por ejemplo, otorgar un servicio de máxima capacidad 2,5 Gbps mediante una red ODN/C. Para ello, el estándar establece las siguientes asociaciones entre paquetes de velocidad y clase de ODN.

CAPACIDAD NOMINAL		ODN MÍNIMO PARA OTORGAR EL SERVICIO
DOWNSTREAM	UPSTREAM	
1.244,16 Mbps	155,52 Mbps	C
1.244,16 Mbps	622,08 Mbps	C
1.244,16 Mbps	1.244,16 Mbps	B
2.488,32 Mbps	155,52 Mbps	B
2.488,32 Mbps	622,08 Mbps	B
2.488,32 Mbps	1.244,16 Mbps	A
2.488,32 Mbps	2.488,32 Mbps	A

Figura 22: Tabla con las capacidades nominales en función del tipo de red [17]

En cuanto a la distancia permitida entre el OLT y el ONT, que garantiza los cotas de capacidad de la tabla anterior, el estándar GPON G.984.2 establece dos tipos de alcances:

- **Alcance lógico.** Es la distancia máxima permitida para la gestión del enlace por capas superiores: MAC, IP, etc. Esta distancia es de hasta 60 km entre el OLT de cabecera y el ONT de usuario.
- **Alcance físico.** Es la distancia máxima de cable físico instalado entre el OLT de cabecera, y el ONT de usuario final, siendo ésta de hasta 20 km.

También existen otros parámetros importantes a tener en cuenta que establece el estándar G.984.2, y que son los que se resumen en la siguiente tabla. Debido a la gran cantidad de datos en función de la velocidad de línea, se subdividirá la información en dos tablas, una para el canal descendente, y otra para el canal ascendente [17].

PARÁMETROS DE INTERFAZ ÓPTICA EN DOWNSTREAM							
CARACTERÍSTICA	UD	FIBRA ÚNICA			FIBRA DOBLE		
TRANSMISOR OLT							
Velocidad Binaria	Mbps	2.488,32			1.244,16		
Longitud de onda	Nm	1480-1500	1260-1360		1480-1500	1260-1360	
Código de Línea	-	NRZ pseudoaleatorizado			NRZ pseudoaleatorizado		
Reflectancia del equipo en la longitud de onda del transmisor	dB	N.A.			N.A.		
Mínma ORL de ODN	dB	> 32			> 32		
Plantilla de diagrama de ojo en transmisor	-	Figura T1			Figura T1		
Clase de ODN	-	A	B	C	A	B	C
Potencia media inyectada MIN	dB	0	+5	+3	+4	+1	+5
Potencia media inyectada MAX	dB	+4	+9	+7	+1	+6	+9

RECEPTOR ONT							
Reflectancia del equipo en la longitud de onda del receptor	dB	< -20			< -20		
Tasa Error Bit	-	< 10 ⁻¹⁰			< 10 ⁻¹⁰		
Clase de ODN	-	A	B	C	A	B	C
Sensibilidad MIN	dBm	-21	-21	-28	-25	-25	-26
Sobrecarga MAX	dBm	-1	-1	-8	-4	-4	-4
Inmunidad a dígitos idénticos consecutivos	Bit	> 72			> 72		
Tolerancia a la fluctuación de fase	-	N.A.			N.A.		
Tolerancia a potencia óptica reflejada	dBm	< 10			< 10		

PARÁMETROS DE INTERFAZ ÓPTICA EN UPSTREAM (1)							
CARACTERÍSTICA	UD	FIBRA ÚNICA			FIBRA DOBLE		
TRANSMISOR OLT							
Velocidad Binaria	Mbps	155,52			622,08		
Longitud de onda	Nm	1260-1360	1260-1360		1260-1360	1260-1360	
Código de Línea	-	NRZ pseudoaleatorizado			NRZ pseudoaleatorizado		
Reflectancia del equipo en la longitud de onda del transmisor	dB	< 6			< 6		
Mínma ORL de ODN	dB	> 32			> 32		
Plantilla de diagrama de ojo en transmisor	-	Figura T2			Figura T2		
Clase de ODN	-	A	B	C	A	B	C
Potencia media inyectada MIN	dB	-6	-4	-2	-6	-1	-1
Potencia media inyectada MAX	dB	+1	+1	+3	+1	+4	+4
RECEPTOR ONT							
Reflectancia del equipo en la longitud de onda del receptor	dB	< -20			< -20		
Tasa Error Bit	-	< 10 ⁻¹⁰			< 10 ⁻¹⁰		
Clase de ODN	-	A	B	C	A	B	C
Sensibilidad MIN	dBm	-27	-30	-33	-27	-27	-32
Sobrecarga MAX	dBm	-1	-1	-8	-6	-6	-11
Inmunidad a dígitos idénticos consecutivos	Bit	> 72			> 72		
Tolerancia a la fluctuación de fase	-	N.A.			N.A.		
Tolerancia a potencia óptica reflejada	dBm	< 10			< 10		

PARÁMETROS DE INTERFAZ ÓPTICA EN UPSTREAM (2)							
CARACTERÍSTICA	UD	FIBRA ÚNICA			FIBRA DOBLE		
TRANSMISOR OLT							
Velocidad Binaria	Mbps	1.244,16			2.488,32		
Longitud de onda	Nm	1260-1360	1260-1360		1260-1360	1260-1360	
Código de Línea	-	NRZ pseudoaleatorizado			NRZ pseudoaleatorizado		
Reflectancia del equipo en la longitud de onda del transmisor	dB	< 6			P.D.		
Mínma ORL de ODN	dB	> 32			P.D.		
Plantilla de diagrama de ojo en transmisor	-	Figura T2			P.D.		
Clase de ODN	-	A	B	C	A	B	C
Potencia media inyectada MIN	dB	-3	-2	+2	P.D.	P.D.	P.D.
Potencia media inyectada MAX	dB	+2	+3	+7	P.D.	P.D.	P.D.
RECEPTOR ONT							
Reflectancia del equipo en la longitud de onda del receptor	dB	< -20			P.D.		
Tasa Error Bit	-	< 10 ⁻¹⁰			P.D.		
Clase de ODN	-	A	P.D.	C	A	B	C
Sensibilidad MIN	dBm	-24	P.D.	-29	P.D.	P.D.	P.D.
Sobrecarga MAX	dBm	-3	P.D.	-8	P.D.	P.D.	P.D.
Inmunidad a dígitos idénticos consecutivos	Bit	> 72			P.D.		
Tolerancia a la fluctuación de fase	-	N.A.			P.D.		
Tolerancia a potencia óptica reflejada	dBm	< 10			P.D.		

Figura 23: *Parámetros de la interfaz óptica en canales descendente y ascendente*

N.A. = no aplica

P.D. = por determinar

A continuación se muestran los gráficos de las figuras 24 [17] y 26 [17] referenciados en las tablas anteriores. Estos diagramas son, respectivamente, los diagramas de ojo del canal descendente y ascendente.

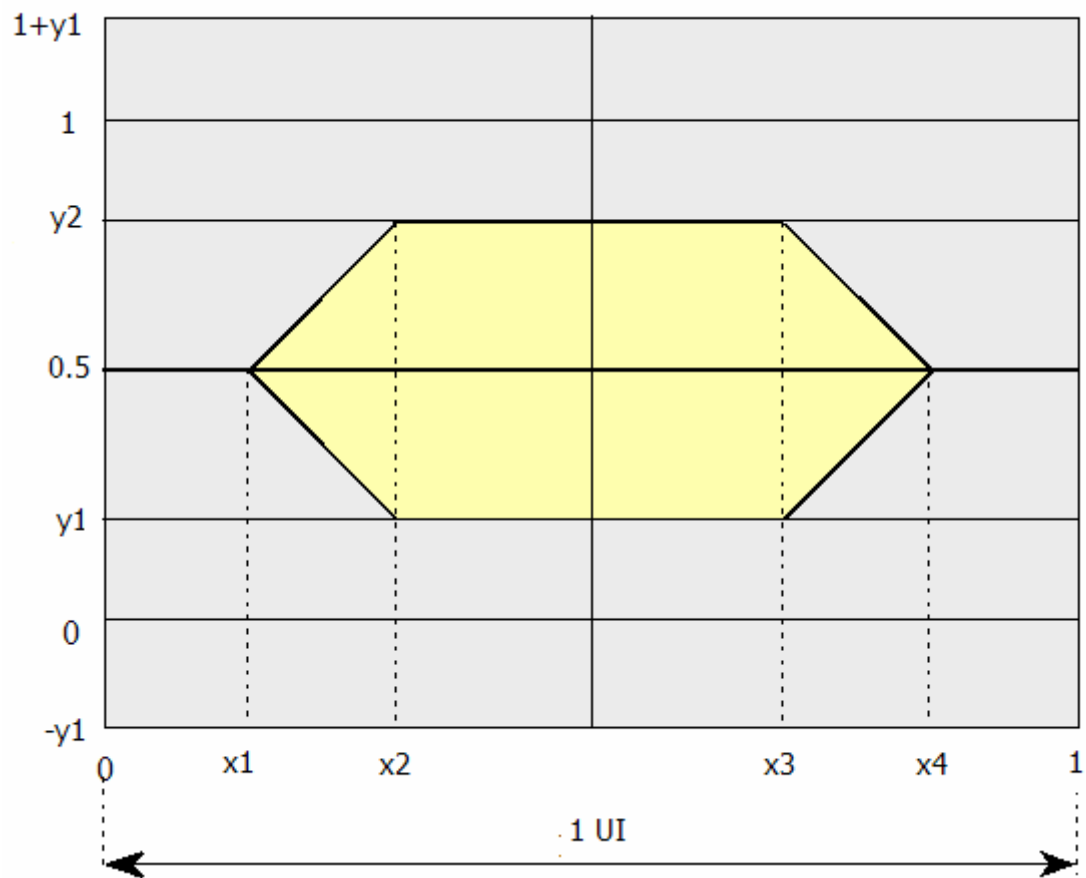


Figura 24: Diagrama de ojo para el transmisor en canal descendente

	1244.16 Mbit/s	2488.32 Mbit/s
x1/x4	0.28/0.72	- -
x2/x3	0.40/0.60	- -
x3/x2	- -	0.2
y1/y2	0.20/0.80	0.25/0.75

Figura 25: Tabla de características del diagrama de ojo para el transmisor en canal descendente

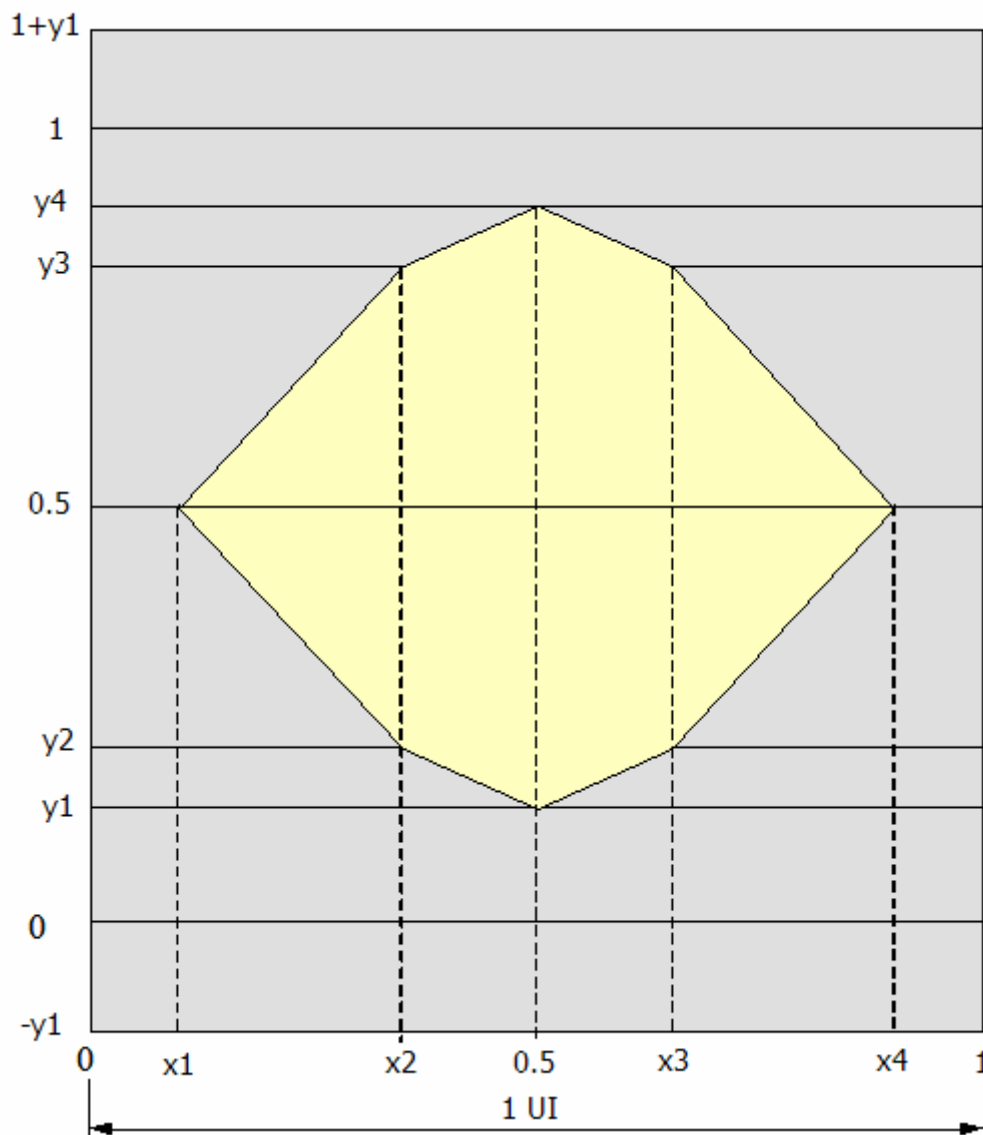


Figura 26: Diagrama de ojo para el transmisor en canal ascendente

	155.52 Mbit/s	622.08 Mbit/s	1244.16 Mbit/s	2488.32 Mbit/s
x1/x4	0.10/0.90	0.20/0.80	0.22/0.78	Pendiente de estudio
x2/x3	0.35/0.65	0.40/0.60	0.40/0.60	Pendiente de estudio
y1/y4	0.13/0.87	0.15/0.85	0.17/0.83	Pendiente de estudio
y2/y3	0.20/0.80	0.20/0.80	0.20/0.80	Pendiente de estudio

Figura 27: Características del diagrama de ojo para el transmisor en canal ascendente

Por último, en cuanto a la capa física se refiere, la normativa G.984.2 establece en los sistemas GPON la utilización de corrección de errores en recepción, consecuencia de los errores en transmisión, sin necesidad de retransmisión de la información original.

Este sistema se denomina **FEC** (*Forward Error Correction*) o corrección de errores en retransmisión, y permite la corrección de errores añadiendo al mensaje original unos bits de redundancia. La fuente digital envía la secuencia de datos al codificador, encargado de añadir dichos bits de redundancia. A la salida del codificador se obtiene la denominada palabra código. Esta palabra código es enviada al receptor y éste, mediante el decodificador adecuado y aplicando los algoritmos de corrección de errores, obtendrá la secuencia de datos original. Los dos principales tipos de codificación usados son:

- **Códigos bloque.** La paridad en el codificador se introduce mediante un algoritmo algebraico aplicado a un bloque de bits. El decodificador aplica el algoritmo inverso para poder identificar y, posteriormente corregir los errores introducidos en la transmisión.
- **Códigos convolucionales.** Los bits se van codificando tal y como van llegando al codificador mediante un proceso de filtrado digital, de modo que la redundancia se introduce a través de la memoria. Cabe destacar que la codificación de uno de los bits está enormemente influenciada por la de sus predecesores. La decodificación para este tipo de código es compleja ya que en principio, es necesaria una gran cantidad de memoria para estimar la secuencia de datos más probable para los bits recibidos. En la actualidad se utiliza para descodificar este tipo de códigos el algoritmo de Viterbi, por su gran eficiencia en el consumo de recursos.

Además, G.984.2 establece para GPON en relación con la tasa de error de bit y el sistema FEC, la definición de Ganancia **G** de codificación, siendo ésta la diferencia entre la potencia óptica a la entrada del receptor con FEC, y la potencia óptica a la entrada del receptor sin FEC para una tasa de error de bit $BER = 10^{-10}$. Gráficamente, se puede expresar la ganancia de codificación según la relación existente entre la tasa de BER y la potencia óptica, tal y como se muestra en la figura 28 [17].

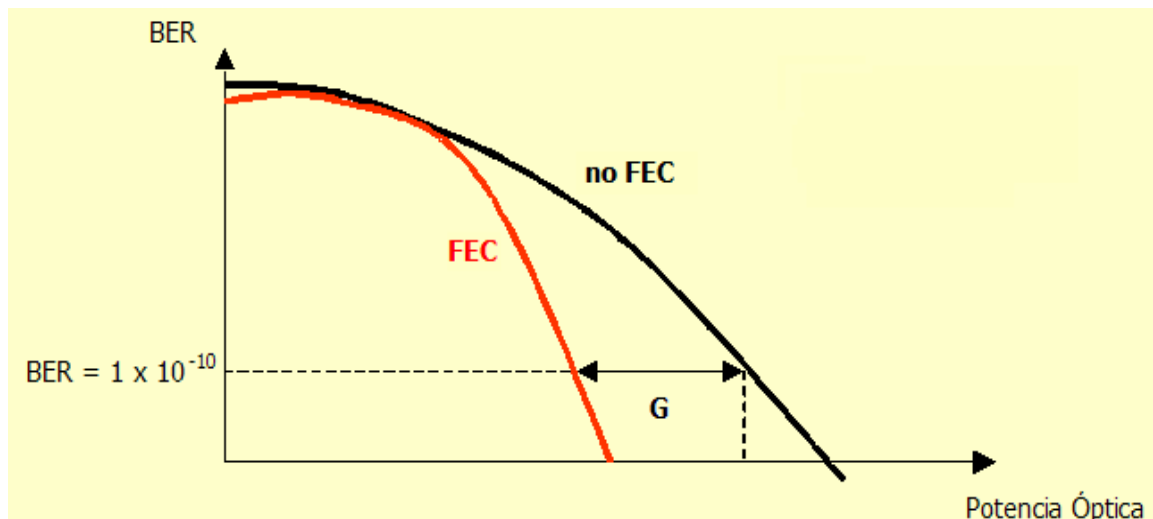


Figura 28: Relación BER/Potencia óptica

De acuerdo con el estándar G.984.2, la definición de Ganancia sirve para optimizar la potencia de transmisión. Así pues, dicha Ganancia puede utilizarse para reducir la potencia de transmisión, en aquellos casos donde la distancia entre el OLT y

el ONT sea menor, y se requiera menos potencia; o bien, puede utilizarse para reducirse la sensibilidad del receptor, con el mismo fin.

Estas dos operaciones no pueden realizarse simultáneamente, a pesar de que garantizan el mismo objetivo, para facilitar el interfuncionamiento de los equipos OLT y ONT.

2.6.3. Canales de transmisión

El estándar GPON, y más concretamente la normativa ITU-T G.984.3 [18], establece ciertas particularidades respecto a los protocolos de transmisión, tanto para el canal ascendente como para el descendente. A pesar de que mantiene los protocolos de funcionamiento y acceso al medio, incorpora algunas modificaciones susceptibles de ser mencionadas. Las más importantes, son las que se especifican a continuación.

2.6.3.1. Canal Descendente

Al igual que ocurriera en transmisión PON, la transmisión del canal descendente se basa en tecnología TDM (*Time Division Multiplexing*) por difusión. Todos los datos se transmiten a todas las ONTs a través de los divisores, que tan sólo se dedica a replicar los datos. Cada ONT filtra los datos recibidos (sólo se queda con aquellos que van dirigidos hacia él) que se envían en intervalos temporales determinados. Gráficamente, esta difusión por TDM se puede expresar de la siguiente forma [18]:

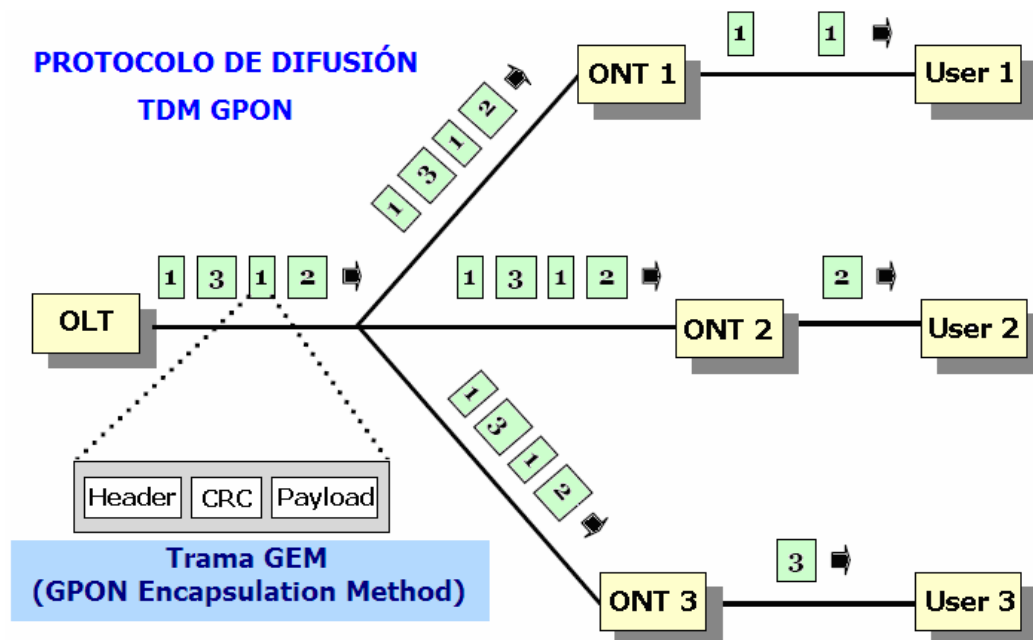


Figura 29: Protocolo de difusión TDM GPON

Este protocolo de transmisión introduce cierto problema de confidencialidad de los datos enviados, dado que la información se transmite a todos los usuarios. Debido a ello, el estándar GPON G.984.3 introduce un método de encriptación denominado AES

(*Advance Encryption Standard*). AES actúa con un tamaño de bloque de datos fijo de 128 bits y tamaños de clave de 128 bits también. Por otra parte, opera ambos datos en una matriz de 4x4 bytes, denominada “*state*”. La mayoría de los cálculos del algoritmo se llevan a cabo en un campo finito determinado. Para el cifrado, cada ronda de la aplicación del algoritmo (excepto la última) consiste en cuatro pasos:

- *SubBytes* — en este paso se realiza una sustitución no lineal donde cada byte es reemplazado con otro de acuerdo a una tabla de búsqueda.
- *ShiftRows* — en este paso se realiza una transposición donde cada fila del *state* es rotado de manera cíclica un número determinado de veces.
- *MixColumns* — operación de mezclado que opera en las columnas del «*state*», combinando los cuatro bytes en cada columna usando una transformación lineal.
- *AddRoundKey* — cada byte del «*state*» es combinado con la clave «*round*»; cada clave «*round*» se deriva de la clave de cifrado usando una iteración de la clave.

La ronda final reemplaza la fase *MixColumns* por otra instancia de *AddRoundKey*.

Una vez encriptada la información o carga útil a enviar, se produce el encapsulamiento de trama. Las tramas definidas por el estándar G.984.3 para redes GPON se denominan GEM (*GPON Encapsulation Method*) o método de encapsulamiento GPON. Al igual que las tramas PEM, para transmisión sobre redes genéricas APON, o BPON, el protocolo de transferencia GEM determina un tamaño de trama aleatorio, aunque determina la longitud de algunos de sus campos:

- **Cabecera (*header*)**; este campo contiene información sobre sincronización de la trama y posee una longitud fija de 32 bits.
- **CRC**; que permite conocer si la información enviada ha llegado correctamente y sin errores a su destino. Posee una longitud fija de 8 bits.
- **Carga útil (*payload*)**; Sobre este campo, se carga la información procedente del protocolo superior, con una longitud de hasta 1518 bytes. En este caso, encapsula y cifra la información procedente del paquete Ethernet o bien de la celda ATM.

En caso de transmisión Ethernet, la trama está constituida por los siguientes campos:

- **Preámbulo (7 bytes)**. Secuencia de bits usada para sincronizar y estabilizar el medio físico antes de iniciar la transmisión.
- **SOF (1 byte)**, Inicio de trama. Indica que el siguiente bit será el más significativo del campo de dirección MAC de destino.

- **DA** (6 bytes), Dirección de destino. Especifica la dirección MAC de tipo EUI-48 hacia la que se envía la trama.
- **SA** (6 bytes); Dirección de origen. Especifica la dirección MAC de tipo EUI-48 desde la que se envía la trama.
- **Tipo** (2 bytes). Identifica el protocolo de red de alto nivel asociado con el paquete o, en su defecto, la longitud del campo de datos.
- **Datos** (0 – 1500 bytes). Este campo contiene la información recibida del nivel de red (la carga útil).
- **Relleno** (0 – 46 bytes). Campo que se utiliza cuando la trama Ethernet no alcanza los 64 bytes mínimos.
- **FCS** (4 bytes). Secuencia de verificación de trama. Contiene un valor de verificación CRC.

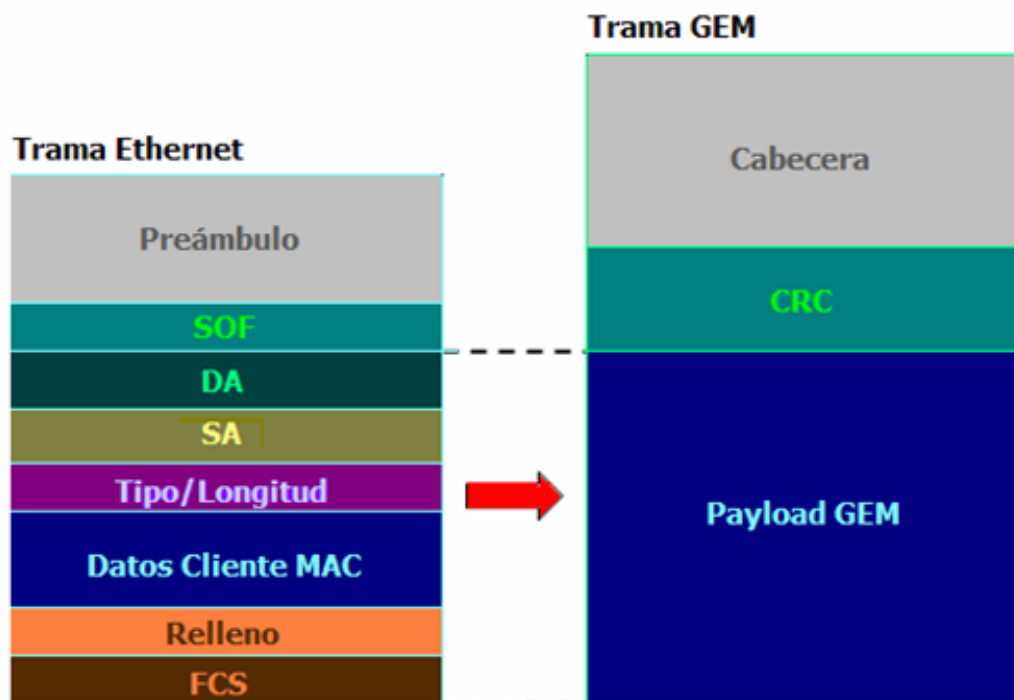


Figura 30: Encapsulado de la trama Ethernet sobre GEM

Si por el contrario, se produce transmisión sobre ATM, las celdas (NNI) están constituidas por los siguientes campos:

- **GFC** (Control de flujo genérico, o *generic flow control*, 4 bits): El estándar originariamente reservó el campo GFC para labores de gestión de tráfico, pero en la práctica no es utilizado. Las celdas NNI lo emplean para extender el campo VPI a 12 bits.

- **VPI** (Identificador de ruta virtual, o *virtual path identifier*, 8 bits). Se utiliza para indicar la ruta de destino o final de la celda.
- **VCI** (Identificador de circuito virtual, o *virtual circuit identifier*, 16 bits): Se utiliza para indicar la ruta de destino o final de la celda.
- **PT** (Tipo de información de usuario, o *payload type*, 3 bits): identifica el tipo de datos de la celda (de datos del usuario o de control).
- **CLP** (Prioridad, o *cell loss priority*, 1 bit): Indica el nivel de prioridad de la celda. Si este bit está activo cuando la red ATM está congestionada la celda puede ser descartada.
- **HEC** (Corrección de error de cabecera, o *Header Error Correction*, 8 bits): contiene un código de detección de error que sólo cubre la cabecera (no la información de usuario), y que permite detectar un buen número de errores múltiples y corregir errores simples.

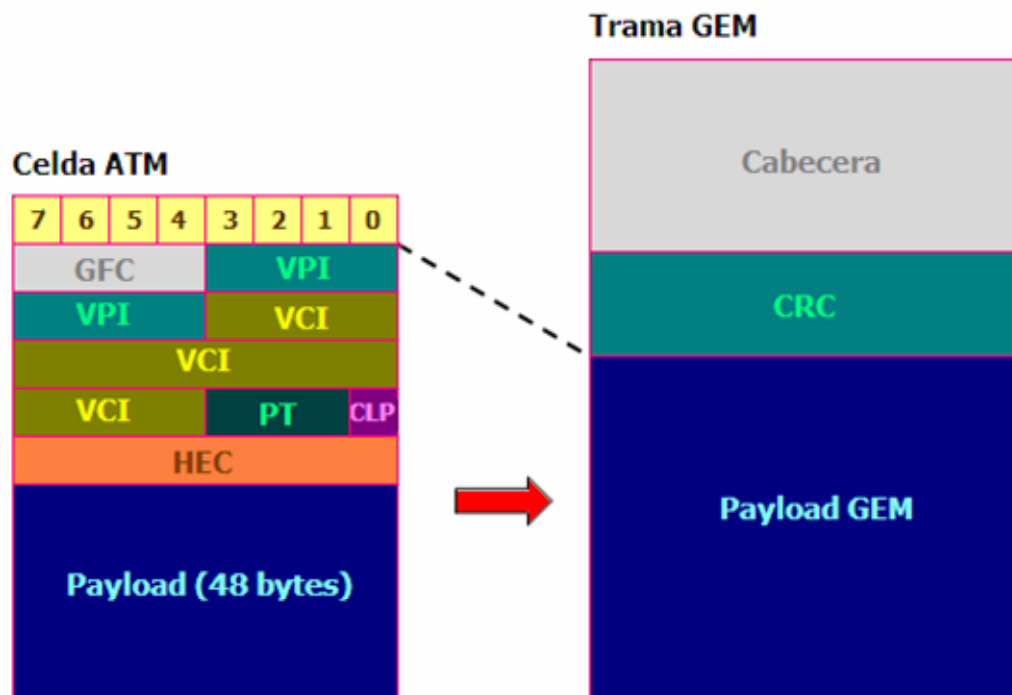


Figura 31: Encapsulado de celda ATM sobre GEM

Una vez realizada la encapsulación de Ethernet o ATM sobre GEM, es necesario que éstas se encapsulen a su vez sobre tramas TDM para poder transmitirse desde el OLT hasta el resto de ONT en modo broadcast o difusión. Las tramas TDM, poseen longitud fija de 125 μ seg, con una capacidad máxima de:

- 19.440 bytes, para transmisión a velocidad de 1,244 Gbps.
- 28.880 bytes, para transmisión a velocidad de 2,488 Gbps.

Además, las tramas TDM suelen estar aleatorizadas en cuanto a contenido, salvo sus 32 bits iniciales, que están destinados a sincronización de la misma.

La estructura general de trama TDM es muy sencilla. Está constituida por dos campos principales, siendo éstos:

- **PCBd** (32 bits), o bloque de control físico del canal descendente (*Physical Control Block downstream*). Este campo lleva cabo la sincronización de la trama, y posee diversa información sobre la misma. Así pues, el PCBd, está a su vez constituido por varios campos:
 - ♦ **Alloc-ID**, identificador de localización (*Allocation identifier*). Campo de 12 bits encargado de la identificación de ONTs.
 - ♦ **Init** o inicio, que indica el intervalo temporal de inicio de trama GEM asociada a un Alloc-ID determinado.
 - ♦ **End** o final, que indica el intervalo temporal de final de trama GEM asociada a un Alloc-ID determinado.
- **Carga útil** o *payload* (19.436 bytes ó 28.836 bytes). La información que contiene este campo es la procedente del protocolo superior (GEM). La carga útil, puede estar constituida por varias tramas GEM con destino para uno o varios usuarios finales. De ahí la necesidad del Alloc-ID, ya que gracias a él, le permite conocer a qué usuario va destinada cada trama GEM, así como la longitud de la misma.

El proceso de encapsulamiento de la trama ATM se puede observar gráficamente en la figura 32 que aparece a continuación [18]:

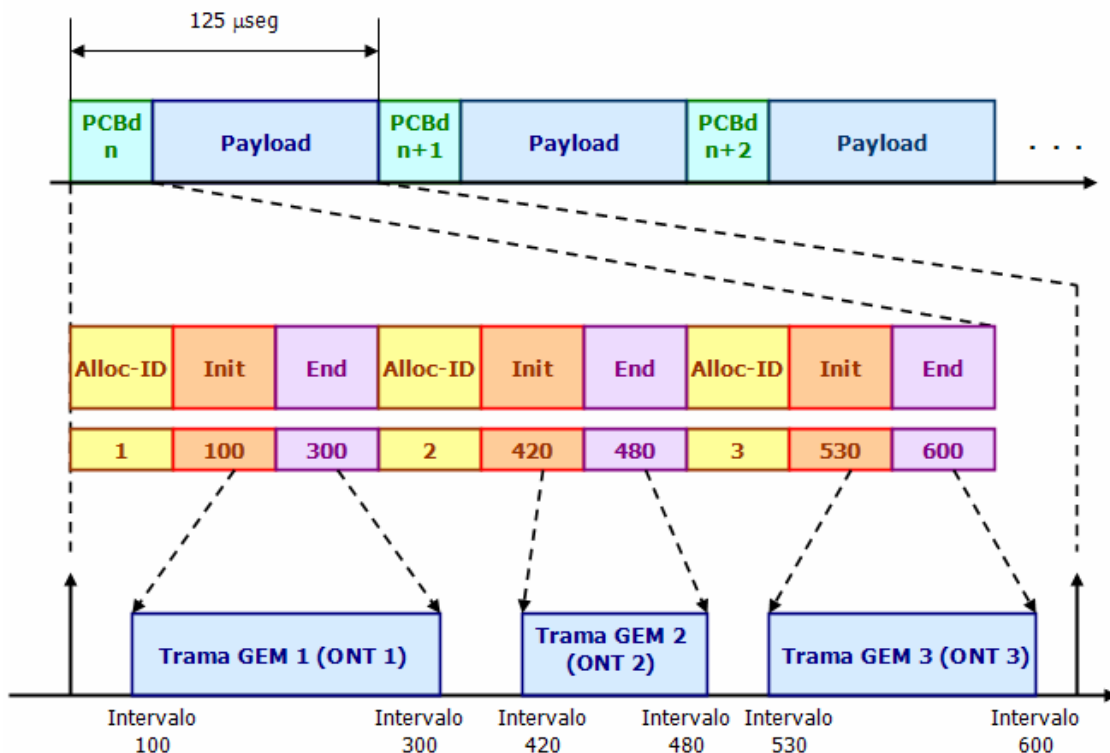


Figura 32: Encapsulado de la trama TDM

Por tanto, la transmisión en el canal descendente en redes GPON, se lleva a cabo mediante la pila de protocolos: Ethernet/ATM sobre GEM, y GEM sobre TDM, tal y como se representa en las figura 33 y 34 que se muestran a continuación:

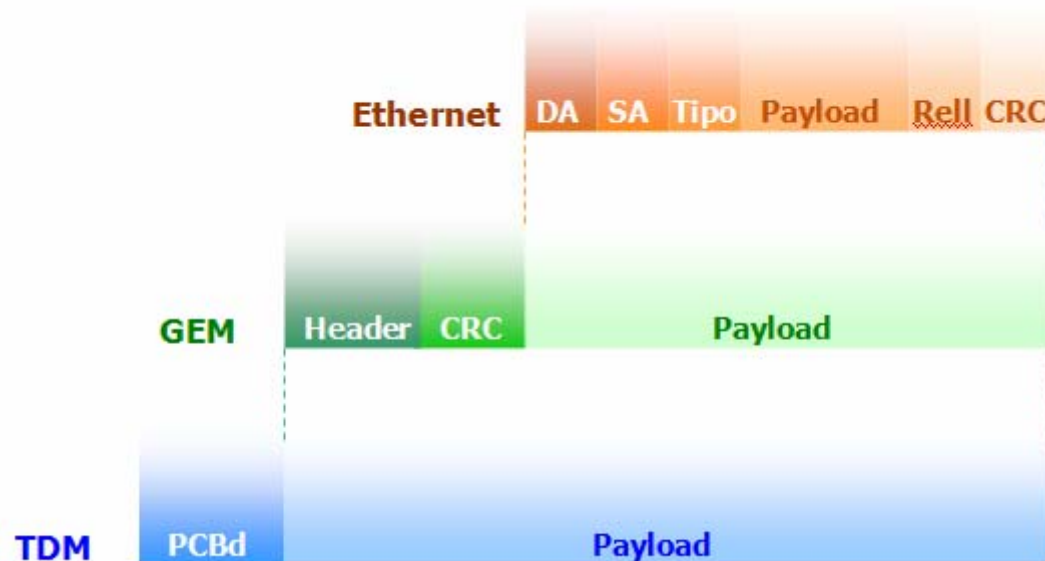


Figura 33: Pila de protocolos en canal descendente: transmisión Ethernet

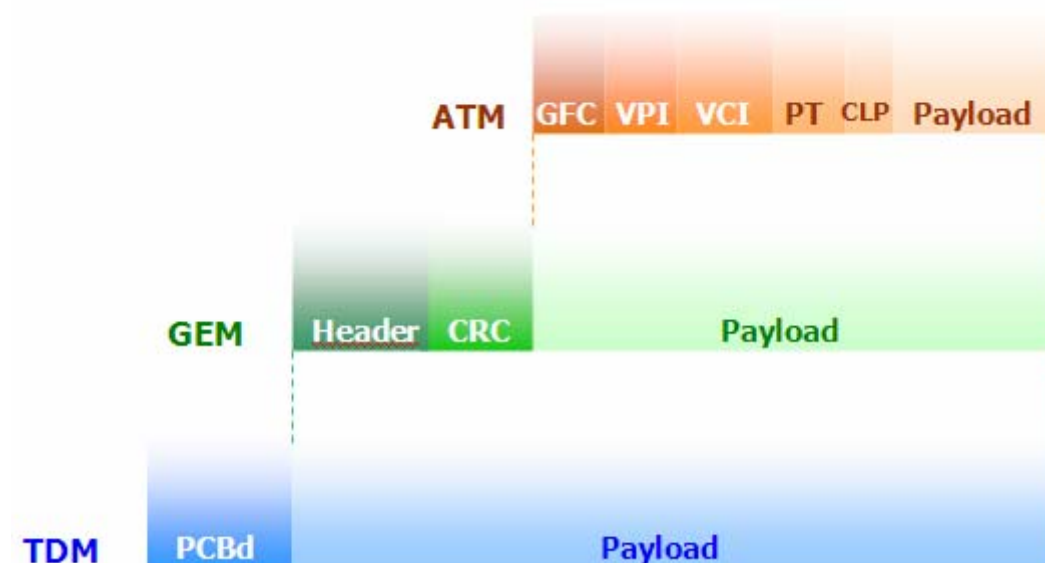


Figura 34: Pila de protocolos en canal descendente: transmisión SYM

2.6.3.2. Canal ascendente

Para este canal, y tal y como se especificó para las redes PON [18] utiliza tecnología TDMA (*time division multiple access*) o acceso múltiple por división en el tiempo. El OLT controla el canal ascendente, asignando ventanas en diferentes instantes

de tiempo a las ONT. Se requiere un control de acceso al medio para evitar colisiones y para distribuir el ancho de banda entre los usuarios.

Las tramas TDMA del canal ascendente poseen una longitud variable en función de la información que envían las ONTs y son aleatorias. Esto es, cada trama puede poseer información de uno o varios ONT, por lo que es necesario que la información que viaja en la trama diferencie completamente de dónde procede la información.

Para llevar a cabo este proceso de manera segura, es necesaria la perfecta sincronización de los paquetes ascendentes que llegan al OLT, para que éste sea capaz de formar la trama GEM. Es por ello necesario que el OLT conozca la distancia a la que están las ONTs para tener en cuenta el retardo que incorpora cada una de ellas a la trama.

El proceso a través del cual el OLT calcula la distancia a la que se encuentra cada ONT de sí mismo, se denomina *Ranging*. Con este mecanismo, el OLT sitúa a cada ONT a la misma distancia virtual de él mismo, y entre ellas. De forma esquemática, el proceso de ranging se puede representar de la siguiente manera [18]:

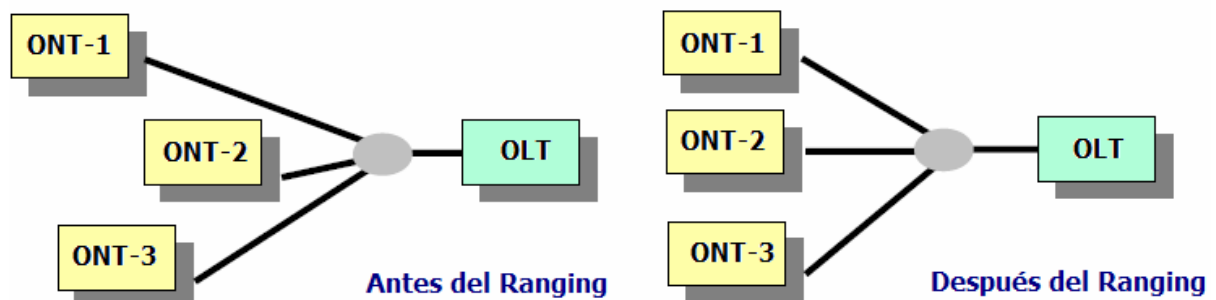


Figura 35: Sincronización mediante Ranging

Para ello, el OLT envía a cada ONT un pulso de trama genérico en difusión. Una vez establecida esta distancia genérica para todas respecto del OLT, todos los ONT comienzan a transmitir un pulso genérico, evitando que la información de unos colisione con la de otros (físicamente se encuentran todos a distancias diferentes).

El OLT, recoge el pulso procedente de cada ONT. Si bien, cada una llega en un instante de tiempo diferente, lo que permite al OLT asignar a cada ONT un retardo de ecualización o *ranging time*. Este retardo de ecualización se define como el tiempo que tarda en llegar un pulso desde el ONT hasta el OLT de cabecera, tal y como se puede observar en la figura 36 [8]:

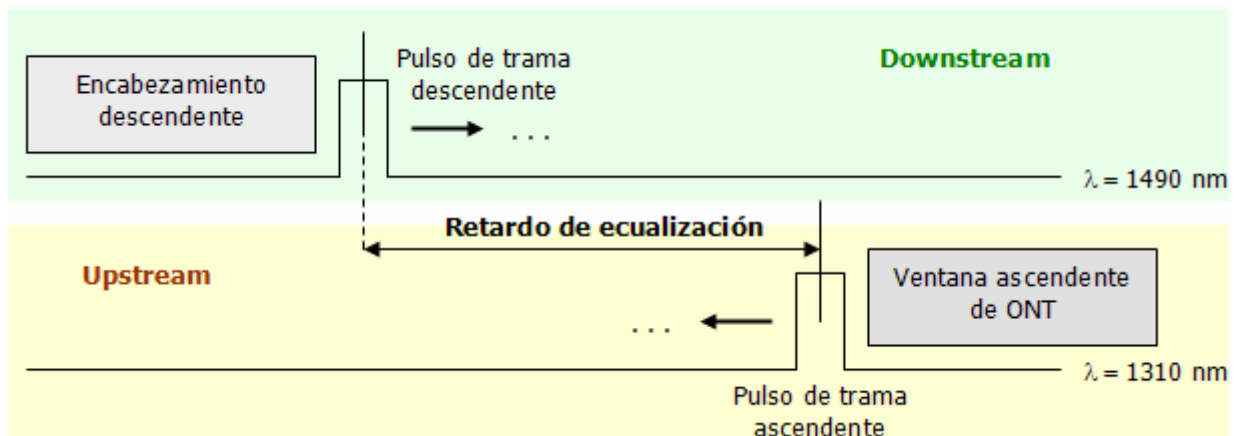


Figura 36: Retardo de ecualización o Ranking time

La sincronización obtenida a partir de este procedimiento se mantiene gracias a las tramas de usuarios ONT que van llegando al OLT. En caso de no existir datos de usuario para enviar al OLT, los ONT envían tramas sin servicio, con objeto de mantener la sincronización entre ambos extremos.

Por último, cabe destacar, que las tramas TDMA incluyen un campo denominado BIP (*bit interleaved parity*) o bit de paridad, de 8 bits encargado de la detección de errores. El BIP, consiste en un campo de un byte que precede a la carga útil de la trama y que, en caso de errores en el mismo, permite reconocerlos y tratarlos.

2.6.3.3. Consideraciones generales para ambos canales

Todos los elementos situados entre OLT y ONT (fibra óptica, divisores ópticos, repartidores y conectores) son elementos pasivos (no requieren alimentación eléctrica). Esto implica que la OLT necesita un mecanismo que le permita identificar a cada uno de los usuarios que tiene conectados a una misma fibra.

Para ello se ha creado un elemento denominado número de serie de ONT, que debe estar configurado tanto en la OLT como en la ONT. La OLT debe tener un registro de los números de serie de ONT de todos los usuarios y a qué puerto pertenecen (es decir, de qué fibra cuelgan) [19].

El número de serie está compuesto por 8 bytes (64 bits). Los primeros 4 bytes identifican al fabricante y los 4 siguientes a la ONT propiamente dicha. Para que sea más manejable, se suele convertir el número a ASCII (8 caracteres ASCII) o a hexadecimal (16 caracteres hexadecimales) [19].

Uno de los principales problemas que se ha intentado resolver en la tecnología GPON ha sido el conseguir gestión remota del equipamiento de usuario, ya que cada visita a casa del cliente supone un elevado coste económico. Esto permite reducir los costes derivados del OPEX.

Para ello, dentro de la norma GPON G.984.4 de la ITU-T se ha desarrollado un protocolo denominado OMCI, interfaz de control y mantenimiento ONT (*ONT Management and Control Interface*). Este protocolo permite la configuración remota de las ONTs, cuyas funciones principales son [19]:

- Establecer y liberar conexiones en la ONT
- Gestionar los puertos físicos de la ONT
- Solicitar información de configuración y estadísticas de rendimiento
- Informar autónomamente al operador del sistema de eventos, tales como cortes de fibra

El protocolo OMCI se ejecuta sobre una conexión GEM entre la controladora del OLT y la controladora de la ONT y se establece durante la fase de arranque de la ONT. Es decir, para cada ONT se establece un canal de gestión entre OLT y ONT. Este protocolo es asimétrico: el OLT es el maestro y la ONT es el esclavo. Un único OLT empleando diversas instancias del protocolo sobre canales de control independientes puede controlar múltiples ONTs. Los requerimientos de la OMCI dados en la recomendación G.984.4 son necesarios para manejar la ONT en las siguientes áreas:

- Gestión de la configuración
- Gestión de fallos y seguridad
- Gestión del rendimiento

El protocolo OMCI es uno de los aspectos fundamentales para garantizar la interoperabilidad entre fabricantes.

2.7. Servicios ofrecidos por la red FTTH

Las redes FTTH, tal y como se ha especificado en apartados anteriores, surgen como solución a la problemática de la convergencia de redes, ofreciendo servicios bajo un único soporte físico. Y es por ello, que las redes FTTH, deben de dar respuesta a este requerimiento, ofreciendo servicios convergentes. A diferencia de otras redes de telecomunicaciones, donde cada servicio viaja por canales diferentes o bajo protocolos de transmisión distintos, FTTH ofrece servicios generales de voz, datos y video integrados, bajo plataforma IP (IPTV). Comúnmente, este servicio integrado se denomina **Triple Play**.

Triple-Play [6] se define por tanto como el empaquetamiento de servicios y contenidos audiovisuales (voz, banda ancha y televisión), bajo un mismo soporte físico (fibra óptica), y toda la información encapsulada en datagramas IP. Es la comercialización de los servicios telefónicos de voz junto al acceso de banda ancha, añadiendo además los servicios audiovisuales (canales de TV y pago por visión). Esta plataforma posibilita un servicio más personalizado al usuario debido a que el cliente dispone de los servicios y contenidos que él desea utilizar en el momento idóneo; mejora la calidad de los servicios, llegando hasta los hogares la calidad digital; y por último, ofrece nuevas posibilidades en telefonía y un abaratamiento del acceso a Internet.

A continuación se describen los servicios generales ofrecidos por *Triple Play* bajo FTTH:

2.7.1. Servicios de voz

Los servicios de voz ofrecidos por las redes FTTH, varían en función del grado de contrato del cliente final, y son muy variados. Los más importantes son [6] [7]:

- POTS (*plain old telephone services*) o servicio de voz tradicional, ya sean líneas simples o dúplex.
- VoIP, ofrecido a 0,5 Mbps. Es el ejemplo más característico. Aunque se encuentra en uso, es de relativa reciente implantación. Gracias a las redes de fibra, sería posible la utilización de centralitas con multitud de llamadas IP simultáneas, es decir, gestión de llamadas a través de paquetes IP de centralita a centralita.
- Voz alta calidad (*premium*) ofrecido a 0,5 Mbps.

El ancho de banda mínimo consumido por los servicios de voz empaquetados bajo Triple Play es de 1.5 Mbps, lo que supone un total de hasta tres líneas de voz diferentes de alta calidad.

2.7.2. Servicios de datos

Los servicios de datos ofrecidos por las redes FTTH son servicios de banda ancha. Así pues, se ofrece Internet a muy elevada velocidad, ofertando gran cantidad de posibilidades. Las más importantes son [6] [7]:

- Servicios de entretenimiento digital, que engloban descargas de música y video a tasas de velocidad elevadas. La descarga de vídeos o programas cada vez más voluminosos por una creciente complejidad de los sistemas operativos, se vería reducida en el tiempo convirtiéndose en casi transparente para el usuario, dadas las altas tasas de velocidad de red.
- Servicios de juegos en línea o *gaming*, que requieren un alto ancho de banda, dada la complejidad del software o la cantidad de usuarios conectados simultáneamente.
- Servicios P2P basados en el compartimiento de archivos multimedia.
- Acceso a información de forma rápida y eficaz. El acceso a redes de ordenadores como Internet, redes corporativas de empresa para tele-trabajo,

o la propia red del proveedor de servicios, aumentarían su velocidad a niveles muy elevados.

- Servicios de mensajería instantánea e emails con gran contenido de información. Aplicaciones tales como MSN Messenger, Yahoo Messenger, AOL o Skype, ofrecen este tipo de servicios, aunque aumentando las posibilidades entre usuarios y la calidad del servicio.
- Líneas de datos privadas, incluso dentro del hogar.
- Servicios generales de monitorización y seguridad. A través de estas redes, se pueden supervisar y telecontrolar instalaciones, por ejemplo. El control remoto de estas instalaciones domóticas o industriales requieren un ancho de banda elevado, en función de nuevas resoluciones de cámaras de grabación y de los puntos a controlar.

El volumen total de consumo de ancho de banda de los datos es muy variado, por lo que evaluar su consumo es complicado. No obstante, el consumo medio por usuario para este tipo de servicios es del orden de 3 Mbps.

2.7.3. Servicios de video

Los servicios de video ofrecidos por las redes FTTH son casi los más atractivos desde el punto de vista doméstico, y en los que los operadores hacen más hincapié. Así pues, los servicios de video más importantes son los siguientes [6] [7]:

- SDTV (*standard definition TV*) o video de definición estándar sobre IPTV. Ofrece un servicio de difusión televisiva con más de 30 canales diferentes.
- HDTV (*high definition TV*) o video alta definición sobre IPTV. Para este tipo de difusión de video, se utiliza la codificación MPEG-4 a 7,5 Mbps; o bien la codificación WM9, a 10 Mbps. Ofrece un servicio con más de 10 canales diferentes.
- VoD (*video on demand*) o video bajo demanda o video a la carta. Este sistema permite al usuario el acceso a contenidos multimedia de forma personalizada. El usuario puede elegir en cualquier momento el programa que desea ver, sin depender de un horario fijo de programación; del mismo modo puede detener el programa y reanudarlo a voluntad.
- PPV (*pay per view*) o servicios de pago por visión o pago por evento. Es una modalidad de televisión de pago, en la que el abonado paga por los eventos individuales que desea ver. Éstos pueden ser eventos deportivos, películas recién estrenadas, conciertos musicales importantes, etc
- Servicio de Radiodifusión FM, AM, etc.

- VCR para grabaciones, con sintonizador propio y autoprogramable.
- Posibilidad de video simultáneo de hasta 4 servicios diferentes por hogar, ya sean SDTV o HDTV, lo que suponen un total de consumo de hasta 14 Mbps.
- Videoconferencia, que al disponer de alta capacidad en la red, permite transmitir a un mayor número de imágenes por segundo, llegando a tasas que transmiten las televisiones convencionales, y con una resolución y calidad de audio superiores.
- Otros servicios poco implantados en nuestro país, tales como el denominado *e-learning*, que se basa en la educación a distancia, o teleeducación, desde los hogares, sin necesidad de asistir o desplazarse a centros docentes; o la telemedicina, donde se puede diagnosticar a un paciente sin que éste tenga que moverse de casa, y sin necesidad de acudir a la consulta.

2.8. Situación actual de la tecnología FTTH y previsiones de futuro

El despliegue y puesta en servicio de redes FTTH es bastante reciente. Así pues, y a pesar de los primeros estándares a principios de los 2000, no fue hasta dos años más tarde cuando se inició el despliegue de la red física, ofreciendo los primeros servicios hacia el 2003. En **EEUU** son varias las compañías que comenzaron a invertir en 2003. Las más importantes, ya comenzaron los despliegues y anunciaron importantes inversiones en la tecnología para ofrecer amplios servicios en un futuro inmediato [6].

Por ejemplo la compañía *Verizón* anunció en 2003 un plan de inversiones superiores a los 60.000 millones de dólares hasta 2010, buscando pasar a 14 millones de hogares con FTTH. Por otra parte, *SBC* se propuso en 2008 invertir más de 6.000 millones de dólares en los próximos 5 años, para tener un alcance de penetración de 18 millones de hogares conectados a FTTH. También *BellSouth*, presentó un plan de inversiones en 2008 de más de 3.500 millones de dólares para superar en los próximos 5 años los 8 millones de hogares conectados a FTTH [6].

Las primeras pruebas de estas compañías, sólo alcanzaban los 622 Mbps en canal descendente, y 155 Mbps en el ascendente, garantizando una tasa por usuario de hasta 30 Mbps en canal descendente, y 5 Mbps en el ascendente.

En la zona de **Asia-Pacífico**, las inversiones a lo largo de los últimos años han sido muy superiores a las del resto del mundo. De hecho, los países orientales cuentan con la mayor tasa de penetración de la banda ancha del mundo. En Japón, la banda ancha al hogar tiene un índice de penetración del 40% de la población. Las inversiones en tecnología FTTH comenzaron en el año 2001, y en 2005 ya contaban con más de 3 millones de hogares conectados. La compañía más importante de Japón, *NTT* ya comunicó en 2006 un plan de inversiones de más de 38 Billones de euros, con el objetivo de alcanzar en 2010 los 30 millones de hogares conectados a FTTH [6].

En Corea del Sur, se está llevando a cabo una importante migración de la tecnología xDSL a FTTH desde principios de los 2000. Este país ya cuenta con índice de penetración de fibra hasta los edificios del orden del 35%. Para ello lanzaron el denominado “lu-Korea vision”, que pretende posicionar al país en la vanguardia mundial, cuyas primeras ofertas comerciales de FTTH se realizaron en Abril de 2005. También Hong-Kong, está llevando a cabo importantes inversiones en el despliegue de fibra, y adaptando su red xDSL a las necesidades del mercado. Apuesta más por la llegada de la fibra hasta los edificios (FTTB) y el nivel de penetración de esta tecnología supera ya el 25% [7].

Otros países con economías emergentes, como China, ya han trasladado su deseo de seguir los pasos de Corea del Sur, puesto que las inversiones de migración son menores que las de despliegue.

En **América del Sur**, la tecnología FTTH se encuentra en fase de inversión y despliegue, aunque prácticamente ningún país posee una red que oferte servicios FTTH a más de un millar de usuarios. El único país destacado en esta tecnología es Chile, que desde finales de 2005 ya ofrece el servicio FTTH a 100 Mbps simétricos en algunas zonas de Santiago de Chile. La empresa encargada de la explotación y comercialización es *GTD-Manquehue*, y el servicio, va acompañado de dos líneas de telefonía IP ilimitadas [21].

Brasil, también destaca por sus inversiones en este sector, aunque no por servicios ofrecidos. La empresa brasileña *Padtec* ya cuenta con una red de fibra en el país del orden del 40%, aunque no hasta los hogares. Sin embargo, se ha apresurado a lanzar los primeros equipos GPON, y ya se han realizado los primeros pilotos IPTV en algunos de los barrios de mayor nivel socioeconómico de Sao Paulo [7].

Otros países, como Argentina, Venezuela o Colombia, tienen planes de inversión algo menos cuantiosos, pero no menos importantes en redes FTTH. El anuncio de inversión de la brasileña *Padtec* en estos países, se une al de otras propias de dichos países, como son *Telefónica de Argentina* o *Telecom Argentina* [6].

En el caso de **Europa**, las inversiones en despliegue de redes de fibra, ha comenzado más tarde que en otros países desarrollados. La mayor cuota de inversión durante los 3 últimos años ha sido la realizada por países nórdicos como Suecia, Noruega o Dinamarca.

A pesar de que estos países tienen índices de penetración de hasta 5 veces menos que Japón o Corea del Sur, se están realizando importantes esfuerzos económicos por parte de las operadores de telefonía por desplegar la red FTTH en sus respectivos países, llegando a cuotas del orden de entre el 5 – 7 % de penetración de servicio a los hogares.

El motivo por el que Europa ha retrasado sus inversiones en FTTH, viene ligado a la comercialización del ADSL en los hogares. La tecnología xDSL en Europa, ha tenido gran aceptación, más de lo esperado por las compañías telefónicas. Así pues, lo que surgió como alternativo a la RDSI, que nunca llegó a alcanzar las ventas comerciales esperadas, se ha convertido en la banda ancha a desplegar más común en Europa. Sistemas como el ADSL2+, que permiten alcanzar sobre el cobre velocidades de hasta

20 Mbps; o los VDSL y VDSL2, que permiten alcanzar hasta velocidades cercanas a los 100 Mbps sobre cobre, han retrasado la inversión en infraestructura de fibra óptica en los últimos años, dado el alto coste de despliegue de la misma [7] [21].

A continuación, se muestra la figura 37 [6], en la que se representan las velocidades máximas en canal descendente en función del cobre con las diferentes tecnologías xDSL del mercado.

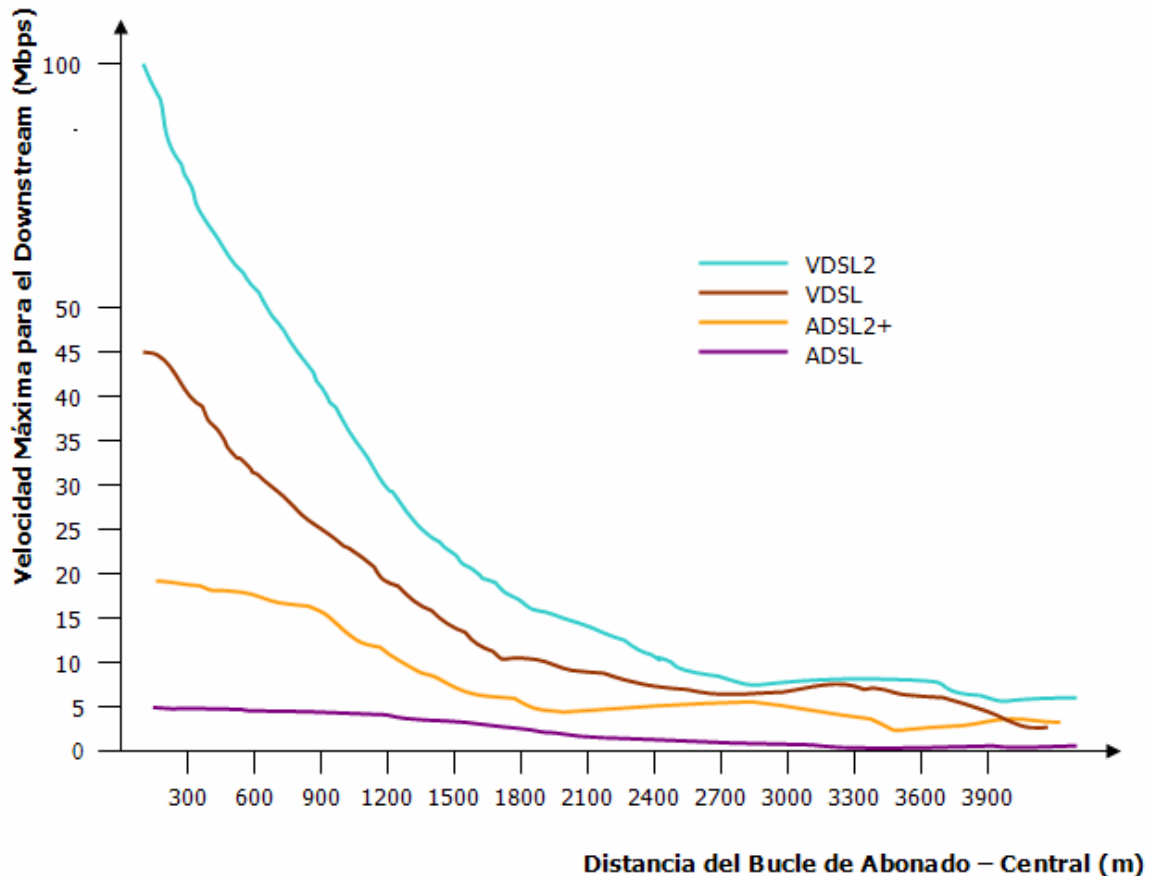


Figura 37: Velocidades de transmisión xDSL sobre cobre

Sin embargo, los gobiernos de la UE ejercieron bastante presión a las operadoras para no quedarse atrás en el despliegue de redes de fibra óptica respecto de otras grandes potencias. Esto, unido a la necesidad de ofertar mayor cantidad y calidad de servicios, anejos a la fuerte demanda del mercado, llevó a las compañías a invertir y de forma importante en el despliegue de redes FTTH.

En Francia, la compañía *Free* anunció en 2008 su proyecto de FTTH, comprando la compañía *Cité Fibre*, que ya ofrece actualmente fibra óptica hasta los hogares a una velocidad de 100 Mbps, así como servicios de *Triple Play*. El despliegue inicial de esta compañía se ha realizado por diferentes distritos de París, a través de la compañía *Nicominvest*. Por otra parte, *France Telecom* tiene intención de desplegar su propia red de fibra óptica hasta los hogares, con un potencial mercado para 2010 [6].

En Holanda, los habitantes de la ciudad de Nuenen, han construido su propia infraestructura de FTTH de 100 Mbps simétrica, tratándose de la primera alternativa de

este tipo en Europa respecto a los modelos de operadores tradicionales de telecomunicaciones, aunque este caso es excepcional en la UE.

En el resto de los Países Bajos, así como en Alemania, la compañía *KPN Telecom* comenzó el despliegue durante 2007 de su red de fibra óptica con un mercado potencial de más de 25 millones de clientes. Aunque en Alemania, el mercado del FTTH ya comenzó a lo largo del año 2005, donde la compañía *EWETel* comenzó un despliegue parcial de tecnología FTTH en comarcas del Norte de Alemania [6].

En Reino Unido, la compañía *NTL* está realizando las pruebas necesarias para poder ofrecer a sus clientes conexiones de 100 Mbps mediante el despliegue de una red FTTH troncal por todo el país. También la compañía *BT* comenzó en 2007 un plan de despliegue masivo de FTTP (fibra hasta las instalaciones), dando servicio en la actualidad a más de 3000 hogares y a más de 100 empresas [6].

Otros países como Italia, también tienen una cuota de servicios FTTH bastante importante, en comparación con el resto de países europeos. Así por ejemplo, la compañía italiana *FastWest* ha desplegado red FTTH a lo largo de 6 ciudades en el país, otorgando servicios Triple Play a más de 400.000 usuarios domésticos [7].

El mercado de FTTH en España, se encuentra en pleno desarrollo y comienzo de despliegue. Así pues, *Telefónica* ya ha realizado las primeras pruebas de campo en Pozuelo de Alarcón y Campamento en Madrid, alcanzando velocidades de hasta 50 Mbps. A lo largo del año 2008, la compañía realizó más de 200 nuevas instalaciones que ofrecerán cobertura en 2009 a más de 200.000 hogares [21].

Desde el año 2005 se está desplegando la primera red de fibra hasta el hogar en la zona de los valles mineros del Principado de Asturias (*Asturcon*). Una inversión de capital prácticamente público mediante el cual se pretende lograr una reconversión de las zonas mineras ya deprimidas desde hace años por la decadencia del sector, implicando a más de 21 poblaciones. Se trata éste del primer proyecto de estas características en España. Para su realización, se creó una empresa pública denominada Gestor de Infraestructuras Públicas de Telecomunicaciones del Principado de Asturias S.A. (*GIT*), que se encarga de gestionar esta red FTTH y posibles futuras infraestructuras públicas [6] [21].

Esta iniciativa ha permitido la creación de las infraestructuras necesarias para crear una red neutra donde se están prestando servicios de banda ancha y telefonía a través de un acuerdo con la empresa sueca *Adamo*.

El 10 de Mayo de 2007 la CMT lanzó una consulta pública sobre las Redes de Acceso de Nueva Generación (NGN), directamente vinculado a las redes FTTH y los servicios ofrecidos por la misma. También el 20 de Enero de 2008 la CMT emitió el informe denominado “Principios y líneas maestras de la Futura Regulación de las Redes de Acceso de Nueva Generación NGA”. A día de hoy, no existe marco regulatorio, aunque es muy probable que dicho organismo se incline por fijar una regulación asimétrica por zonas, las cuales estén en función de la densidad de población de cada área geográfica (distinguiendo entre áreas urbanas, semiurbanas y rurales), así como del número de operadoras de telecomunicaciones y del grado de competencia existente entre ellas en cada una de dichas áreas [22].

Las inversiones requeridas para el despliegue de redes FTTH en España, en una primera fase, ha sido cifrada por Telefónica en más de 4.000 millones de euros, aunque el ritmo de la inversión dependerá del marco regulatorio. De hecho, la modalidad FTTH, será en los próximos años la más intensiva en cuanto a inversiones a realizar, de entre las diferentes modalidades de despliegue de los diferentes operadores, pues afecta tanto a las estructuras internas de los conductos existentes desde las centrales, como al tendido de cables dentro de edificios y hogares de los usuarios [23].

A causa de las barreras existentes para el despliegue de este tipo de infraestructuras, esencialmente de carácter económico, es lógico que el despliegue inicial en España sólo se esté realizando en urbanizaciones y zonas de nueva construcción. Más adelante, y siempre a muy largo plazo, podría generalizarse su implantación en otras áreas urbanas con una elevada densidad de población, siempre en función de las expectativas de rentabilidad y retorno de la inversión esperado por las operadoras.

Comparativamente con el resto del mundo, España se encuentra en una de las posiciones más bajas en despliegue y servicios de FTTH, situándonos muy por debajo incluso de otros países de la UE con menos inversión, como Italia o Reino Unido. Sin embargo, el plan de inversiones contemplado por los operadores, tanto telefónicos como neutros (tales como empresas eléctricas –*Iberdrola*, *Unión Fenosa*-, o de transporte –*ADIF*-), prevén un aumento importante en el despliegue de esta tecnología en los próximos años.

A continuación, se muestra una gráfica que recoge aquellos países del mundo con mayor índice de penetración de FTTH o FTTB+LAN en el año 2008 [6].

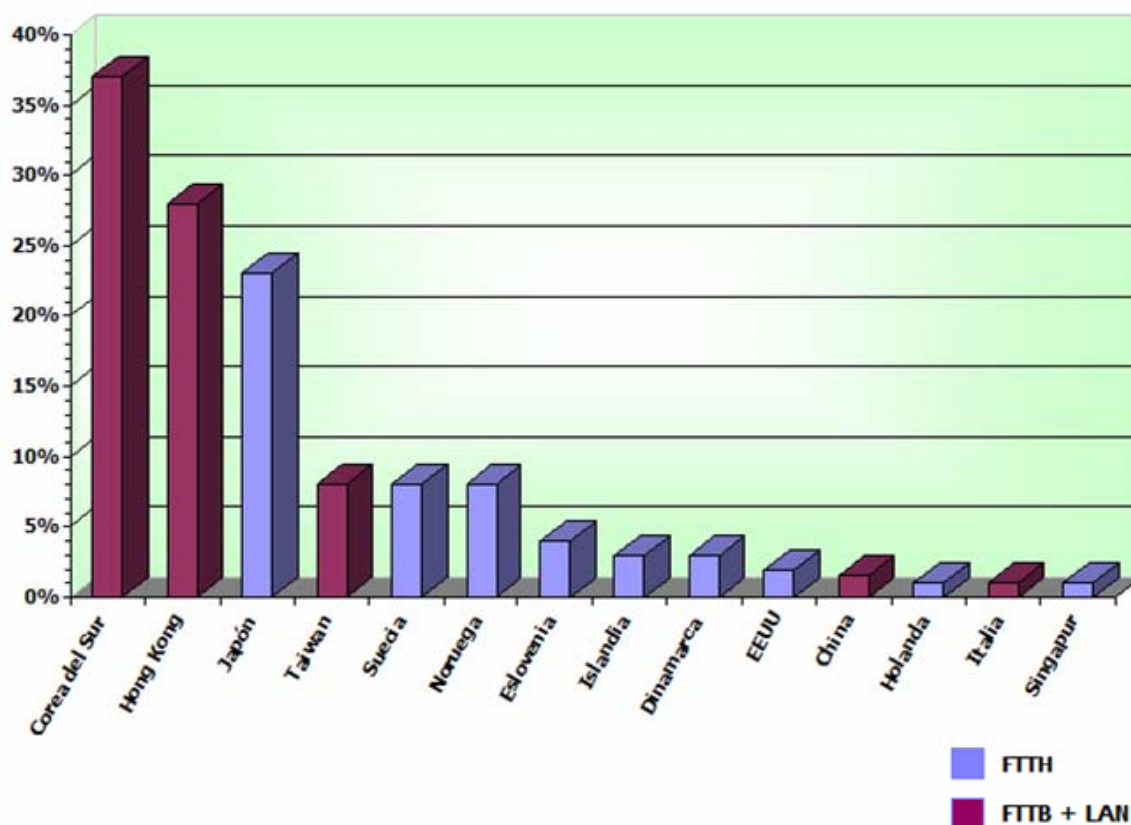


Figura 38: Economías con más de un 1% de penetración de FTTH

Con estos datos, se pueden extraer varias conclusiones de la situación actual, y de las previsiones de un futuro crecimiento. Así pues, se puede denotar el año 2006 como el comienzo de implantación de redes FTTH bajo estándar GPON, cuyo despliegue a nivel mundial sigue siendo una tarea pendiente. A lo largo de 2007 y 2008, se realizaron importantes avances en despliegue de redes GPON para ofrecer servicios FTTH, y será a lo largo de 2010 cuando se empiecen a instalar nuevos componentes ópticos, aumentando la capacidad y posibilitando accesos con velocidad 10G PON, aún no estandarizado. Esta tecnología está aún en fase de investigación por las operadoras de los países donde el FTTH se encuentra como tecnología implantada, como Japón.

Finalizado el año 2010, se pretende alcanzar una red estandarizada que aumente la capacidad aún más de lo decretado a través del estándar GPON, aplicando técnicas más avanzadas de CWDM (WDM-PON). A partir de entonces, se espera que hacia el año 2012 esta tecnología continúe avanzando, aumentando las posibilidades de capacidad de la red, así como de ancho de banda, dedicando una longitud de onda por usuario (DWDM).

Se puede representar gráficamente estos datos, desde el año 2005, en que comienza la implantación de la tecnología, hasta el año 2010, con las previsiones realizadas por los operadores más importantes de cada país [6].

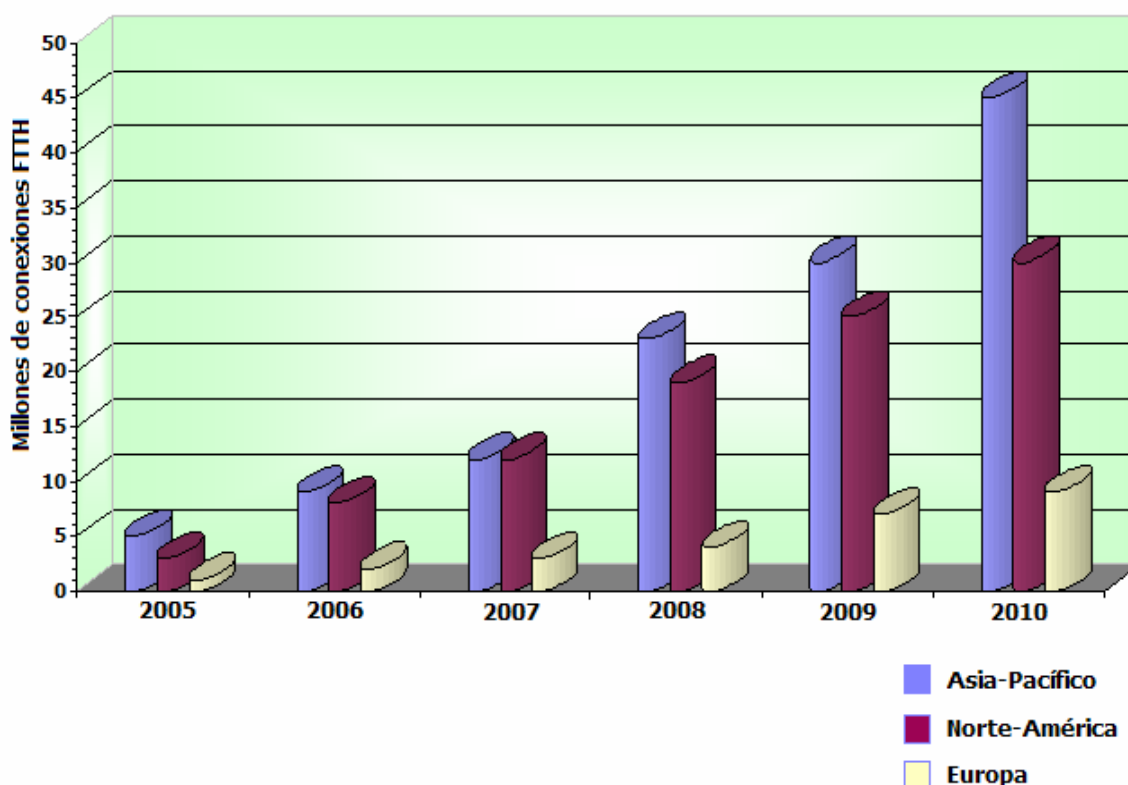


Figura 39: Evolución temporal de conexiones FTTH por regiones

Aquí en España, a corto plazo *Telefónica* tiene previsto desplegar durante 2009 conexiones bajo la tecnología FTTH en los grandes núcleos urbanos, cubriendo casi el 50% del territorio nacional. Para este despliegue, la empresa reutilizará parte de la infraestructura de fibra óptica que ya puso hace diez años [24].

El plan piloto de FTTH de *Telefónica*, que actualmente se está realizando en Madrid y Barcelona entre algunos de sus clientes, tiene una velocidad de 30 Mbps de bajada y 1 Mbps de subida con un precio de promoción durante las pruebas de bajada de 9 euros hasta septiembre de 2008 [24].

Aunque el precio y la velocidad final aún no ha sido revelado por la operadora, según algunos analistas especializados podría estar en torno a los 40 euros a 60 euros por 100 Mbps. Otros operadores como *Orange*, también están invirtiendo en tecnología FTTH para lanzar sus propias propuestas comerciales; o incluso operadores neutros, como *Iberdrola* o *Unión Fenosa*, capaces de implantar su red de fibra oscura para luego comercializarla a diversos operadores telefónicos.

Capítulo 3

Fundamentos de transmisión en fibra óptica

Dada la relevancia del canal de transmisión para una buena comunicación en sistemas FTTH, a lo largo del presente capítulo se detallarán todos los aspectos generales con los que debe contar una red de transmisión en fibra óptica, tanto los elementos pasivos como los activos. El principal elemento de estudio será la fibra óptica, en torno a la cual se especificarán el resto de elementos clave en una red de comunicaciones óptica.

3.1. Introducción

La fibra óptica es un medio de transmisión empleado habitualmente los sistemas de transmisión FTTH, y en otras de datos en general. Se puede definir como un filamento muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. El haz de luz queda completamente confinado y se propaga por el núcleo de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total en aplicación de la Ley de Snell. La fuente de luz puede ser láser o un LED.

El fundamento por el cual se utiliza la fibra óptica como medio de transmisión en sistemas FTTH es, aparte de por su propia definición, porque son redes confinadas para dedicar al usuario un elevado ancho de banda. Y es precisamente la fibra óptica la que permite enviar gran cantidad de datos a gran velocidad, mayor que las comunicaciones de radio y cable. Además, son el medio de transmisión inmune a las interferencias por excelencia, lo que aumenta sus ventajas técnicas a las ya comentadas.

A lo largo del capítulo, se detallaran las características genéricas de la fibra óptica, particularizando aquellos aspectos de la misma más influyentes sobre los sistemas de transmisión FTTH.

3.1.1. Historia de la fibra óptica

Como resultado de estudios en física enfocados de la óptica, se descubrió un nuevo modo de empleo para la luz llamado rayo láser. Este último comenzó a utilizarse con mayor vigor en el área de las telecomunicaciones debido a lo factible que era enviar mensajes con altas velocidades y con una amplia cobertura. Sin embargo, no existía un conducto para hacer viajar los fotones originados por el láser.

La posibilidad de controlar un rayo de luz, y poder dirigirlo hacia una trayectoria recta se conoce desde hace mucho tiempo. En 1820, Augustine-Jane Fresnes ya conocía las ecuaciones que rigen la captura de la luz dentro de una placa de cristal lisa. Basándose en los estudios empíricos de estas ecuaciones, el físico irlandés John Tyndall descubrió que la luz podía viajar dentro de un material (agua), curvándose por reflexión interna y en 1870 demostró sus estudios a los miembros de la Royal Society [25].

Unos años más tarde, concretamente en 1880, Alexander G. Bell comenzó a realizar experimentos basados en los estudios de Tyndall, consiguiendo comunicarse con luz a través del denominado *Fototeléfono* [26].

Sin embargo, la globalización de los conceptos anteriores, a lo que entonces se conocía como comunicación a través cables de vidrio fue obra de D. Hondros y Peter Debye en 1910.

A partir de este principio se llevaron a cabo una serie de estudios, en los que demostraron el potencial del cristal como medio eficaz de transmisión a larga distancia. Además, se desarrollaron una serie de aplicaciones basadas en dicho principio para iluminar corrientes del agua en fuentes públicas.

Más tarde, hacia 1930 J. L. Baird registró ciertas patentes que describían la utilización de bastones sólidos de vidrio en la transmisión de luz, para su empleo en un primitivo sistema de televisión de colores. El gran problema, sin embargo, era que las técnicas y los materiales utilizados no permitían la transmisión de luz con buen rendimiento. Las pérdidas eran muy elevadas y no existían dispositivos de acoplamiento óptico [26].

Hasta 1950 las fibras ópticas no comenzaron a interesar a los investigadores, como medio de transporte para muchas aplicaciones prácticas que estaban siendo desarrolladas. En 1952, el físico Narinder Singh Kapany, apoyándose en los estudios de John Tyndall, realizó experimentos que condujeron a la invención de la fibra óptica [27].

Uno de los primeros usos de la fibra óptica fue emplear un haz de fibras para la transmisión de imágenes, que se usó en el endoscopio médico. Usando la fibra óptica, se consiguió un endoscopio semiflexible, el cual fue patentado por la Universidad de Michigan en 1956. En este invento se usaron unas nuevas fibras forradas con un material de bajo índice de refracción, ya que antes se impregnaban con aceites o ceras [26].

En esta misma época, se empezaron a utilizar filamentos delgados como el pelo que transportaban luz a distancias cortas, tanto en la industria como en la medicina, de forma que la luz podía llegar a lugares que de otra forma serían inaccesibles. El único problema era que esta luz perdía hasta el 99% de su intensidad al atravesar distancias tan cortas como 9 metros de fibra.

Charles Kao, en su tesis doctoral de 1956, estimó que las máximas pérdidas que debería tener la fibra óptica, para que resultara práctica en enlaces de comunicaciones, eran de 20 dB/km [28].

El descubrimiento del LASER en 1960 por el físico norteamericano Theodore Harold Maiman, como elemento capaz de producir un rayo de luz visible, coherente y monocromático, fue un elemento que revolucionó las fuentes de emisión de luz. Esto permitió que en 1966, un comunicado dirigido a la British Association for the Advancement of Science, los investigadores Charles Kao y G.A. Hockham, de los Laboratorios Standard Telecommunications de Inglaterra, afirmaran que se podía disponer de fibras de una transparencia mayor y propusieron el uso de fibras de vidrio y luz, en lugar de electricidad y conductores metálicos, en la transmisión de mensajes telefónicos [27].

La obtención de tales fibras exigió grandes esfuerzos de los investigadores, ya que las fibras hasta entonces presentaban pérdidas de orden de 100 dB por kilómetro, además de una banda pasante estrecha y una enorme fragilidad mecánica. Este estudio constituyó la base para mejorar las pérdidas de las señales ópticas que hasta el momento eran muy significativas y no permitían el aprovechamiento de esta tecnología.

En un artículo teórico publicado por Kao-Hockman [29], se demostraron que las grandes pérdidas características de las fibras existentes se debían a impurezas diminutas intrínsecas del cristal. Como resultado de los esfuerzos, se hicieron nuevas fibras con atenuación de 20 dB por kilómetro y una banda pasante de 1 GHz para un largo de 1 km, con la perspectiva de sustituir los cables coaxiales. Sin embargo, el gran avance se produjo en 1970, cuando los investigadores Maurer, Keck, Schultz y Zimar que trabajaban para Corning Glass, fabricaron la primera fibra óptica aplicando impurezas de titanio en sílice, con cientos de metros de largo con la claridad cristalina que Kao y Hockman habían propuesto. Las pérdidas llegaron a ser inferiores a 17 dB/km [26].

La utilización de fibras de 100 μm de diámetro, envueltas en nylon resistente, permitirían la construcción de hilos tan fuertes que no puedan ser rotos con las manos. Hoy, ya existen fibras ópticas con atenuaciones tan pequeñas como de 1 dB por kilómetro, lo que es muchísimo menor a las pérdidas de un cable coaxial.

Poco después, Panish y Hayashi, de los laboratorios Bell, mostraron un láser de semiconductores que podía funcionar continuamente a temperatura ambiente. Además, John MacChesney y sus colaboradores, también de los laboratorios Bell, desarrollaron independientemente métodos de preparación de fibras [26].

En 1972, se fabrican las primeras fibras ópticas con núcleo líquido, obteniendo pérdidas de tan sólo 8 dB/km, y tan sólo un año más tarde Corning Glass nuevamente obtiene Fibra Óptica de SiO_2 pura, obteniendo atenuaciones de 4 dB/km, dejando obsoleta a las anteriores [28].

Las investigaciones continúan, y en 1975 se descubría que las fibras ópticas de SiO_2 presentan mínima dispersión en torno a 1300 nm, lo cual suponía disponer de grandes anchuras de banda para la transmisión, en cuanto la dispersión del material de la fibra constituye un factor intrínseco limitativo. Un año más tarde, en 1976, NTT y Fujikura son capaces de fabricar una fibra óptica de atenuación 0,47 dB/km en 1330 nm, muy próximo al límite debido a factores intrínsecos (*Rayleigh*) [26].

Las nuevas posibilidades que ofrecían las fibras ópticas también estimularon la investigación hacia fuentes y detectores ópticos fiables, de bajo consumo y tamaño

reducido. Además todas estas actividades marcaron un punto decisivo, ya que en ese momento sí existían ya los medios para llevar las comunicaciones de fibra óptica fuera de los laboratorios, al campo de la ingeniería habitual.

A finales de la década de los 70, a medida que continuaban las investigaciones, las fibras ópticas mejoraron constantemente su transparencia. Así pues, el 22 de abril de 1977, General Telephone and Electronics envió la primera transmisión telefónica a través de fibra óptica, en 6 Mbit/s, en Long Beach, California. Tan sólo dos años más tarde, en 1979 las nuevas fibras fabricadas alcanzan atenuaciones de 0,12 dB/km con fibras monomodo en 1550 nm [25].

En 1980, las mejores fibras eran tan transparentes que una señal podía atravesar 240 kilómetros de fibra antes de debilitarse hasta ser indetectable. Pero las fibras ópticas con este grado de transparencia no se podían fabricar usando métodos tradicionales. El gran avance se produjo cuando se dieron cuenta de que el cristal de sílice puro, sin ninguna impureza de metal que absorbiese luz, solamente se podía fabricar directamente a partir de componente de vapor, evitando de esta forma la contaminación que inevitablemente resultaba del uso convencional de los crisoles de fundición. El progreso se centraba ahora en seleccionar el equilibrio correcto de componentes del vapor y optimizar sus reacciones. La tecnología en desarrollo se basaba principalmente en el conocimiento de la termodinámica química, una ciencia perfeccionaba por tres generaciones de químicos desde su adopción original por parte de Willard Gibbs en el siglo XIX [26].

También en 1980, la AT&T presentó a la Comisión Federal de Comunicaciones de E.E.U.U. un proyecto de un sistema de 978 kilómetros que conectaría las principales ciudades del corredor de Boston a Washington. Cuatro años después, cuando el sistema comenzó a funcionar, su cable, de menos de 25 centímetros de diámetro, proporcionaba 80.000 canales de voz para conversaciones telefónicas simultáneas. Para entonces, la longitud total de los cables de fibra únicamente en E.E.U.U. alcanzaba 400.000 kilómetros (lo suficiente para llegar a la luna) [28].

Sin embargo, los enlaces demasiado grandes comenzaban a dar problemas. Los amplificadores hasta entonces existentes, debían de realizar la conversión de energía luminosa a eléctrica para poder amplificarla, y luego reconvertirla a energía luminosa para proseguir con su transmisión, lo que suponía pérdidas importantes. Ya en los años 80, aparecen los primeros amplificadores ópticos, que evitan este problema. El primer amplificador que marcó un antes y un después en el uso de la fibra óptica en conexiones interurbanas, reduciendo el coste de ellas, fue el amplificador óptico inventado por David Payne de la Universidad de Southampton, y por Emmanuel Desurvire en los laboratorios de Bell. A ambos se les concedió la medalla Benjamin Franklin en 1988 [26].

Gracias a ello, y a la aparición de la WDM (Multiplexación por División en Longitud de Onda), que permitía la multiplexación de varias señales luminosas por un mismo canal, permitieron fabricar los primeros cables que atravesaron los océanos del mundo, permitiendo transmisión de información diferente entre puntos muy alejados.

El primer enlace transoceánico con fibra óptica fue el TAT-8 que comenzó a operar en 1988, usando un cristal tan transparente que los amplificadores para regenerar

las señales débiles se podían colocar a distancias de más de 64 kilómetros. Tres años después, otro cable trasatlántico duplicó la capacidad del primero. Los cables que cruzan el Pacífico también han entrado en funcionamiento [26].

Desde entonces, se ha empleado fibra óptica en multitud de enlaces transoceánicos o entre ciudades, y paulatinamente se va extendiendo su uso desde las redes troncales de las operadoras hacia los usuarios finales.

Hoy en día, debido a sus mínimas pérdidas de señal y a sus óptimas propiedades de ancho de banda, la fibra óptica puede ser usada a distancias más largas que el cable de cobre. Además, la fibra por su peso y tamaño reducido, hace que sea muy útil en entornos donde el cable de cobre sería impracticable.

En la figura 40, se muestra un eje cronológico donde se enumeran de forma resumida los hitos y años más importantes de la evolución histórica de la fibra óptica.

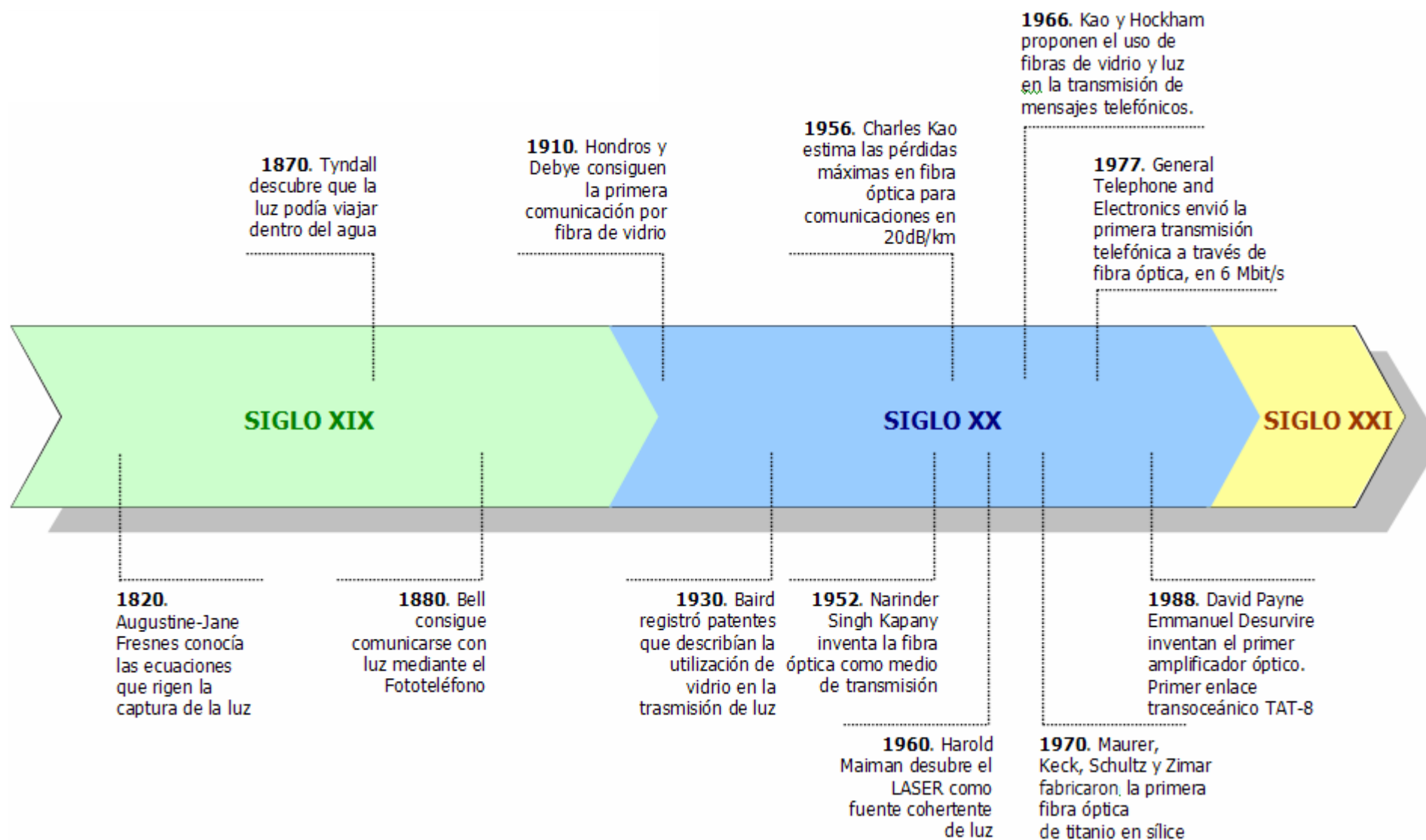


Figura 40: Evolución histórica de la fibra óptica

3.1.2. Características generales de la fibra óptica

Una fibra óptica, tal y como ya se expuso en apartados anteriores, se puede definir como una varilla o filamento de vidrio de alta pureza u otro material transparente. Es bastante flexible, del grosor de un cabello y con un índice de refracción elevado, que permite la transmisión de luz por medio de una serie de reflexiones interiores. En general, la fibra transporta información en forma de haces de luz que pasan a través de ella de un extremo a otro, donde quiera que el filamento vaya, incluyendo incluso curvas y esquinas, sin interrupción alguna [28].

Así pues, este medio de transmisión permite el transporte de multitud de información, utilizándose para aplicaciones tales como télex, Internet, teléfono y televisión por cable, a través de señales mucho más eficaces que con cables de metal, como el cobre.

Una fibra óptica, puede estar recubierta por una envoltura de protección que le confiere la resistencia mecánica necesaria para su manipulación. El conjunto formado por el núcleo (la fibra), la envoltura óptica y la envoltura de protección se completa en sus extremos mediante conectores mecánicos, que facilitan el posicionamiento preciso de la fibra.

Generalmente, las fibras ópticas se compactan y agrupan en haces formados por diversos grupos de fibras (4, 8, 16, 24, 32...) que, a su vez, puede reagruparse para formar un cable o guía de luz, recubierto por un revestimiento de material plástico que protege el conjunto, y cuya apariencia externa es la de un cable flexible.

En función de la designación del material que compone el núcleo de la fibra, se pueden distinguir distintos tipos [30]:

- **Fibra de Sílice.** La sílice, es la forma cristalina más pura del vidrio, y por su transparencia alcanza unas prestaciones excepcionales como vehículo de transmisión de la luz. En general, son muy buenas conductoras en el espectro visible y en el infrarrojo, y se utilizan para la transmisión de información a larga distancia (teléfono, video, cables transoceánicos, etc.)
- **Fibra de Vidrio.** Este tipo de fibra, posee tanto el núcleo como la envoltura óptica de vidrio, con índices de refracción diferentes. En general suelen tener un diámetro pequeño, de entre 50 y 70 micras, y se agrupan en haces multifibra. Son aptas para la iluminación, señalización, transmisión de imágenes, endoscopias, etc.
- **Fibra de Plástico.** Está constituida por un núcleo de Plimetacrilato de Metilo y una envoltura óptica de polímero plástico con índice de refracción diferente. Este tipo de fibra se emplea preferentemente en la iluminación y señalización, y ofrece ventajas en cuanto a uniformidad de transmisión del espectro visible, filtración de rayos ultravioletas e infrarrojos, resistencia mecánica, flexibilidad, peso reducido y facilidad de instalación.

- **Fibra de Núcleo Líquido.** Son de tecnología más reciente, y están compuestas por un núcleo líquido con una envoltura óptica de polímero plástico. Su grosor es superior al de los otros tipos de fibras (entre 3 y 8 mm). Su principal aplicación se orienta hacia la iluminación en modo monofibra.

Entre las principales características de la fibra óptica, se puede mencionar que son muy compactas y ligeras. Además, poseen bajas pérdidas de señal, proporcionan una amplia capacidad de transmisión y poseen un alto grado de confiabilidad debido a su inmunidad a las interferencias electromagnéticas de radio frecuencia.

Una fibra óptica, no conduce señales eléctricas, por lo que son ideales para incorporarse en cables sin ningún tipo de componente conductor y pueden incluso, usarse en condiciones peligrosas de alta tensión. Por otra parte, poseen la capacidad de tolerar altas diferencias de potencial sin ningún circuito adicional de protección y no existen problemas debido a los cortocircuitos.

La fibra posee un gran ancho de banda, que puede ser utilizado para incrementar la capacidad de transmisión con el fin de reducir el coste por canal. Así por ejemplo, un cable de 6 fibras ópticas, permite transportar las señales de más de 5.000 canales diferentes o líneas principales, mientras que se requieren de 10.000 pares de cobre convencional para brindar el servicio a ese mismo número de usuarios [26].

Comparativamente, la transmisión por cobre posee la desventaja de que los propios cables ocupan un gran espacio en los conductos, y requieren grandes volúmenes de material, lo que también eleva los costes.

3.1.3. Ventajas e inconvenientes de la fibra óptica

Los sistemas clásicos de comunicaciones, utilizan señales eléctricas soportadas por cable coaxial, cobre, radio, etc. en función del tipo de aplicación a dar servicio. Estos sistemas presentan algunos inconvenientes y limitaciones que hicieron necesario buscar otras vías para transmisión de datos, basándose en otro tipo de señales diferentes al electromagnetismo, como es el caso de la fibra óptica.

El propio hecho que una fibra utilice la energía luminosa como medio de transmisión, presenta un conjunto importante de ventajas sobre otros soportes utilizados en la transmisión de señales analógicas y digitales.

3.1.3.1. Ventajas de la fibra óptica

Las principales ventajas que ofrece la fibra óptica, como medio de transmisión respecto a otros sistemas basados en señales electromagnéticas sobre metales son [6] [25]:

- Permiten mayor velocidad de transmisión. Las señales recorren los cables de fibra óptica a velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s), mientras que las señales eléctricas recorren los cables a una velocidad entre el 50 - 70% de ésta, según el tipo de cable.
- Mayor capacidad de transmisión. Pueden lograrse velocidades superiores a los 2 Gbps, puesto que la velocidad de transmisión aumenta con la frecuencia de transmisión. El poseer intrínsecamente un mayor ancho de banda, permite la transmisión simultánea de un gran volumen de información. Esta propiedad está relacionada directamente con la anterior.
- Presentan inmunidad total ante las interferencias electromagnéticas. La fibra óptica no produce ningún tipo de interferencia electromagnética y no se ve afectada por las radiaciones o por los impulsos electromagnéticos nucleares (NEMP) que acompañan a las explosiones nucleares.
- No existen problemas de retorno a tierra, interferencias cruzadas y reflexiones como ocurre en las líneas de transmisión eléctricas.
- La atenuación en la transmisión aumenta con la distancia más lentamente que en el caso de los cables eléctricos, lo que permite mayores distancias entre repetidores de señal.
- Se consiguen tasas de error de bit típicas del orden de 10^{-9} frente a las tasas del orden de 10^{-6} que alcanzan los cables coaxiales. Esto permite aumentar la velocidad eficaz de transmisión de datos, reduciendo el número de retransmisiones o la cantidad de información redundante necesaria para detectar y corregir los errores en la transmisión.
- No poseen riesgo de cortocircuito ni de otros daños de origen eléctrico.
- Los cables de fibra óptica, pesan la décima parte que los cables de cobre apantallados, por ejemplo. Ésta es una consideración muy importante en aplicaciones militares, propias de barcos y aviones.
- Suelen tener un diámetro de cable mucho menor. Además, son mucho más flexibles y más fáciles de instalar que los cables eléctricos.
- Los cables de fibra óptica son apropiados para utilizar en una amplia gama de temperaturas, dado que soportan mejor temperaturas extremas que los cables de origen metálico.
- Es más difícil realizar escuchas sobre los cables de fibra óptica que sobre los cables eléctricos. Es necesario cortar la fibra para detectar los datos transmitidos. Por otra parte, las escuchas sobre la fibra pueden detectarse fácilmente utilizando un reflectómetro en el dominio del tiempo o bien, midiendo las pérdidas de señales.

- Permiten incrementar la capacidad de transmisión de datos añadiendo nuevos canales que utilicen longitudes de onda distintas a las ya empleadas, mediante técnicas de WDM.
- La fibra óptica presenta una mayor resistencia a los ambientes y líquidos corrosivos que los cables eléctricos.
- Las materias primas utilizadas en la fabricación de la fibra óptica son muy abundantes, y se espera que con el tiempo el coste de fabricación se reduzca a un nivel similar al de los cables metálicos.
- La vida media operacional y el tiempo medio entre fallos de un cable de fibra óptica, son muy superiores a los de un cable de origen eléctrico.

3.1.3.2. Desventajas de la fibra óptica

La fibra óptica, no sólo tiene ventajas. También presenta ciertos inconvenientes, que no es conveniente olvidar, puesto que limitan en algunas circunstancias los estudios y proyectos de despliegue de algunas redes basadas en este medio de transmisión [6] [25] [30].

- Conversión electro-óptica. Antes de conectar una señal eléctrica de comunicación a una fibra óptica, la señal debe convertirse al espectro luminoso (850, 1310 ó 1550 nm). Esta conversión se lleva a cabo mediante un dispositivo electrónico en el extremo del transmisor, el cuál proporciona un formato propio a la señal de comunicaciones, y la convierte en señal óptica usando un LED o un LASER de estado sólido.
- Caminos homogéneos. Es recomendable un camino físico recto o semirrecto para el cable de fibra. El cable, sin embargo se puede enterrar directamente en tierra, situar en tubos o disponer en cables aéreos a lo largo de dichos caminos homogéneos. Esto puede requerir la compra o alquiler de la propiedad por la que discurren, y algunos derechos sobre el camino puede ser imposibles de adquirir. Para localizaciones como terrenos montañosos o algunos entornos urbanos, pueden ser más adecuados otros métodos de comunicación sin hilos.
- Instalación especial. Debido a que la fibra óptica es predominantemente vidrio de sílice, son necesarias técnicas especiales para la ingeniería e instalación de los enlaces. Ya no se aplican los métodos convencionales de instalación de cables de hilos como, por ejemplo, soldadura, sujeción o crispado. También se requiere de un equipamiento adecuado para probar y poner en servicio los cables. Los técnicos tienen que ser entrenados y preparados previamente para la instalación y puesta en servicio de fibra óptica.

- Reparaciones. Un cable de fibra óptica que ha resultado dañado no es fácil de reparar. Así pues, los procedimientos de reparación requieren un equipo de técnicos con bastante destreza y habilidad en el manejo del equipamiento. En algunas situaciones, puede ser necesario reparar el cable entero. Este problema puede ser aún más complejo si cabe, dado el gran número de usuarios que cuentan con dicho servicio. Es importante, por ello, el diseño de un sistema propio con rutas físicamente diversas, que permita afrontar tales contingencias.

Con todo ello, se puede realizar una valoración inicial, en la que se destaca la multitud de beneficios que tiene la fibra respecto a los medios de transmisión eléctricos. A pesar de los inconvenientes que presenta, la mayoría de ellos van disminuyendo con el paso del tiempo. Al ser un medio de transmisión medianamente reciente, permite que las investigaciones sobre ello sean muy activas. Por otra parte, existe ya un soporte de fibra óptica lo suficientemente maduro como para dar servicio de muy altas prestaciones.

3.2. Fundamentos físicos de transmisión por fibra óptica: óptica geométrica

Los fundamentos físicos de funcionamiento de una fibra óptica, radican en la propagación de uno o varios rayos haces de luz, a lo largo del conducto de vidrio de la fibra (el núcleo). La teoría física que describe este tipo de transmisiones, es la relacionada con la propagación rectilínea de la luz, y por tanto, la óptica geométrica.

A lo largo del siguiente punto, se explicará de forma detallada la teoría que describe la óptica geométrica, y en consecuencia, la naturaleza, transmisión y propagación de la luz a través de un medio cualquiera.

3.2.1 La óptica geométrica y la naturaleza de la luz

Se puede definir la óptica como la rama de la física que se ocupa de la propagación y el comportamiento de la luz. En un sentido amplio, la luz es la zona del espectro de radiación electromagnética que se extiende desde los rayos X hasta las microondas, e incluye la energía radiante que produce la sensación de visión.

El estudio de la óptica, se divide en dos ramas fundamentales, la óptica física, que trata de la naturaleza de la luz y de sus características ondulatorias; y la óptica cuántica, que estudia la acción de las partículas que lleva la luz con la materia y todas las implicaciones cuánticas. Ambas estudian y describen el comportamiento de la luz en el medio de transmisión de la fibra óptica, y por tanto serán objeto de estudio [31].

La energía radiante tiene una naturaleza dual, y obedece leyes que pueden explicarse a partir de una corriente de partículas o paquetes de energía, los llamados fotones, o a partir de un tren de ondas transversales.

El concepto de fotón, se emplea para explicar las interacciones de la luz con la materia que producen un cambio en la forma de energía, como ocurre con el efecto fotoeléctrico o la luminiscencia. Por otra parte, el concepto de onda suele emplearse para explicar la propagación de la luz y algunos de los fenómenos de formación de imágenes.

En las ondas de luz, como en todas las ondas electromagnéticas, existen campos eléctricos y magnéticos en cada punto del espacio, que fluctúan con rapidez. Como estos campos tienen, además de una magnitud, una dirección determinada, son cantidades vectoriales.

Los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y también perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. La onda luminosa más sencilla, es una onda sinusoidal pura, denominada así porque una gráfica de la intensidad del campo eléctrico o magnético trazadas en cualquier momento a lo largo de la dirección de propagación sería la gráfica de una función seno.

Otros conceptos importantes en relación con las ondas son, por ejemplo, el número de oscilaciones o vibraciones por segundo en un punto de la onda luminosa, que se conoce como frecuencia. También es importante el concepto de longitud de onda, que se define como la distancia a lo largo de la dirección de propagación entre dos puntos con la misma fase, es decir, puntos que ocupan posiciones equivalentes en la onda. Por ejemplo, la longitud de onda, es igual a la distancia que va de un máximo de la onda sinusoidal a otro, o de un mínimo, a otro, tal y como se muestra en la figura 41 que se muestra a continuación:

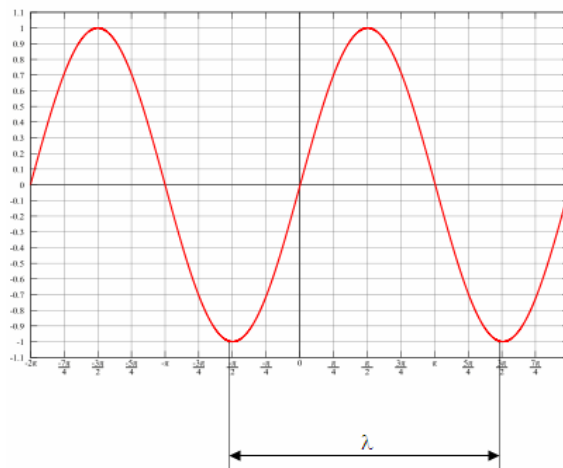


Figura 41: Representación de una onda sinusoidal de período 2π

Existe otro parámetro más que define otra propiedad de las ondas, y es la velocidad de propagación de la misma, sobre un medio determinado. Así pues, existe una relación directa entre la velocidad de propagación, la frecuencia, y la longitud de onda. Se define la velocidad de una onda electromagnética como el producto de su frecuencia y su longitud de onda [32]:

$$v_p = \lambda \cdot f \quad (1)$$

En aquellos casos en los que la onda se propague a través del vacío, la ecuación anterior se particulariza asignando al valor de la velocidad de propagación la velocidad de la luz en el vacío c , siendo ésta de valor $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, y λ_0 la longitud de onda en el vacío:

$$c = \lambda_0 \cdot f \quad (2)$$

La velocidad de una onda en el vacío siempre es la misma independientemente de la longitud de onda, y por tanto, es igual para todas. Sin embargo, la velocidad de la luz en las sustancias materiales es menor que en el vacío, y varía para las distintas longitudes de onda. Este efecto se denomina dispersión, y se explicará más detalladamente a lo largo de este punto [32].

Así pues, la relación entre la velocidad de la luz en el vacío, y la velocidad de una longitud de onda determinada en una sustancia, se reconoce como índice de refracción de la sustancia para dicha longitud de onda. El índice de refracción del aire es, por ejemplo de 1,00029, y apenas varía con la longitud de onda. En la mayoría de las aplicaciones, resulta suficientemente preciso considerar que es 1.

Existen por tanto, infinitos valores de λ y de f que satisfacen la ecuación (1), y de hecho, existe una gran variedad de ondas electromagnéticas cuyas características cumplen con dicha ecuación. Al conjunto de estas ondas, se le denomina espectro electromagnético, dado el enorme rango de variación de la longitud de onda [32].

A continuación, se muestra la figura 42 con el espectro electromagnético de la luz, en función de la longitud de onda y la frecuencia (directamente relacionadas entres sí) [25].

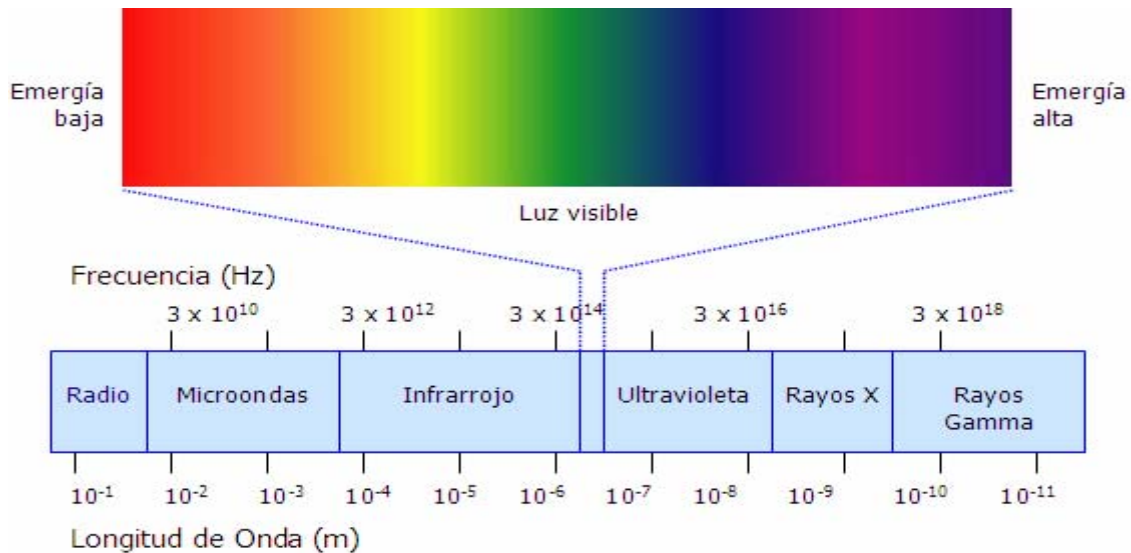


Figura 42: Espectro electromagnético de la luz en función de la longitud de onda

Tan sólo una parte muy pequeña del espectro es visible, es decir, que es capaz de ser percibida por el ojo humano. Estas ondas son aquellas cuyas longitudes de onda están comprendidas en el intervalo 4.000 Å – 7.000 Å ($1 \text{ Å} = 1 \text{ angström} = 10^{-10} \text{ m}$) y correspondientemente sus frecuencias son del orden de 10^{14} Hz [31].

En el espectro visible, las diferentes longitudes de onda se diferencian entre sí por el color. Así pues, el rango visible va desde los 350 nm (color violeta), hasta los 750 nm (color rojo). La luz blanca, se obtiene a partir de la mezcla de todas las longitudes de onda visibles.

Aunque no existen límites muy definidos entre las diferentes longitudes de onda, puede considerarse que la luz ultravioleta se encuentra entre los 10 y los 350 nm, en el extremo inferior con menor longitud de onda; y la radiación infrarroja (entre la que se encuentra la energía calorífica radiante) abarca entre los 750 nm y 1 mm, en el extremo con mayor longitud de onda.

A continuación, se muestra un gráfico representativo del espectro de la luz visible por el ojo humano, en función de la longitud de onda en Angström [32].

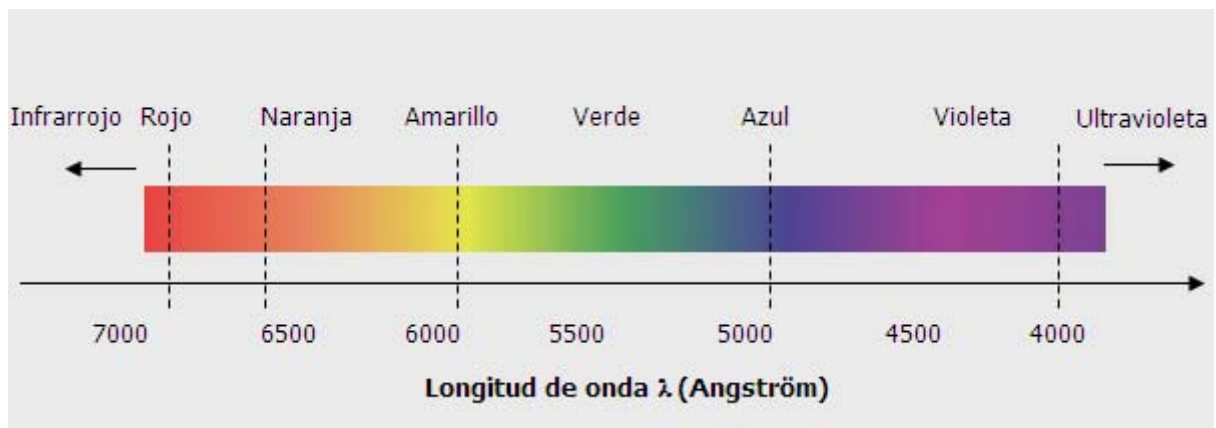


Figura 43: Espectro visible de la luz

3.2.2 Principio de Huygens

Todas las leyes de reflexión y refracción de la luz, se suelen deducir empleando la teoría ondulatoria de la luz, introducida en el siglo XVII por el matemático, astrónomo y físico holandés Christiaan Huygens. En 1690 Huygens, publicó el “Traité de la Lumière”, en el que describe por primera vez el principio que lleva su nombre:

“Toda partícula de materia de la cual procede una onda, no sólo comunica su movimiento a la partícula que le sigue y que está sobre la recta o rayo que surge del punto luminoso, sino a todas las demás que están en contacto con ella y que se oponen a su movimiento. El resultado es que alrededor de cada una de estas partículas surge una onda cuyo centro se encuentra en dicha partícula” [33].

Así pues, el principio de Huygens afirma que todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden. Con ello se puede definir un nuevo frente de onda que envuelve las ondas secundarias. Dado que la luz avanza en ángulo recto a este frente de onda, el principio de Huygens puede emplearse para deducir los cambios de dirección de la luz.

Cuando las ondas secundarias llegan a otro medio u objeto, cada punto del límite entre los medios se convierte en una fuente de dos conjuntos de ondas. El conjunto reflejado vuelve al primer medio, y el conjunto refractado entra en el segundo medio. El comportamiento de los rayos reflejados y refractados puede explicarse por el principio de Huygens [32].

Si bien la luz está constituida por una onda electromagnética, y por lo tanto es capaz de rodear los obstáculos, en la mayoría de las observaciones se puede concluir, que la luz se propaga en forma rectilínea. Para tal fin, basta observar las sombras bien definidas proyectadas por los objetos o la trayectoria de la luz que entra en una estancia oscura a través de un hueco de una ventana.

Por ello, la óptica permite representar la propagación de la luz mediante rayos en vez de ondas, aplicando el **Principio de Propagación Rectilínea de la Luz**. El rayo se considera como la línea de avance de la onda, o dirección de propagación, de la energía radiante, y por tanto, perpendicular al frente de onda [31].

A continuación, se muestran dos frentes de onda, y sus correspondientes rayos para los casos de ondas luminosas que se propagan por ondas esféricas a partir de una fuente puntual, o por ondas planas a partir de una fuente puntual localizada en el infinito [31].

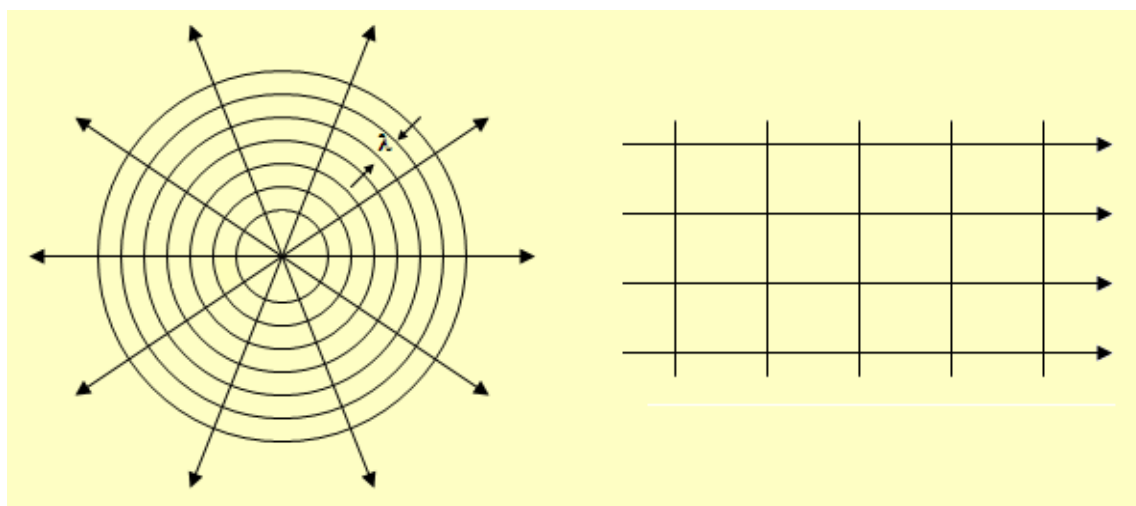


Figura 44: Representación de frente de onda y rayos

En la óptica geométrica, se prescinde de la teoría ondulatoria de la luz, y se supone que la luz no se difracta. La trayectoria de los rayos a través de un sistema óptico se determina aplicando las leyes de reflexión y refracción.

Pero para poder deducir las leyes de reflexión y refracción analíticamente, es necesario conocer previamente el Principio de Propagación Rectilínea de la Luz, o Principio de Fermat.

3.2.3 Principio de Fermat: camino óptico

Tal y como se ha expuesto anteriormente, la velocidad de propagación de la luz en el vacío es de $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Tras muchas observaciones experimentales realizadas a partir del siglo XIX, por científicos como Fizeau o Foucault, y medidas posteriores, se ha demostrado que en diferentes medios de propagación (agua, vidrio, plástico, etc.), la luz posee diferentes velocidades de propagación menores que c .

Por tanto, recordando las ecuaciones (1) y (2) del apartado 3.3.1, existe una relación directa entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío, y la velocidad de propagación de la luz en un medio cualquiera. Se define como índice de refracción n , el número adimensional que equivale al cociente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío, respecto a la velocidad de propagación en otro medio [32]:

$$n = \frac{c}{v_p} \quad (3)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1) y (2), correspondientes a los valores de c y v_p , obtendríamos un nuevo valor de n , siendo éste:

$$n = \frac{c}{v_p} = \frac{\lambda_0 \cdot f}{\lambda \cdot f} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (4)$$

Así, si existen diferentes medios en los cuales la luz se propaga con velocidades diferentes $v_1, v_2, v_3, \dots, v_i$, se puede asociar a estos medios, diferentes índices de refracción $n_1, n_2, n_3, \dots, n_i$, de modo que c :

$$c = n_1 v_1 = n_2 v_2 = n_3 v_3 = \dots = n_i v_i \quad (5)$$

Se considera ahora un haz de luz que se propaga en un medio de índice de refracción n con velocidad de propagación v . Transcurrido cierto tiempo t , el haz habrá recorrido una distancia entre dos puntos cualquiera **A** y **B**, la distancia $\mathbf{AB} = s$, determinada por la siguiente ecuación cinemática:

$$\mathbf{AB} = s = v \cdot t \quad (6)$$

En el mismo instante de tiempo t , un haz de luz que se propaga por el vacío, recorrería una distancia entre ambos puntos del vacío $\mathbf{A_0}$ y $\mathbf{B_0}$ de $\mathbf{A_0B_0} = s_0$ dada por la siguiente ecuación cinemática:

$$\mathbf{A_0B_0} = s_0 = c \cdot t \quad (7)$$

Dado que $c > v, \forall v$, entonces se cumple que:

$$s_0 > s \quad (8)$$

Teniendo en cuenta la relación de la ecuación (3), se puede extraer el valor del parámetro c en función de v y t :

$$c = v \cdot n \quad (9)$$

Con el valor de la velocidad de la luz en función de la velocidad de propagación y el índice de refracción, podemos sustituir (9) en (7) de tal forma que:

$$\mathbf{A_0B_0} = s_0 = c \cdot t = n \cdot v \cdot t \quad (10)$$

La distancia recorrida, que ahora depende de estos tres parámetros, puede ser expresada de forma más reducida, aplicando (6) sobre la ecuación anterior, por lo que se obtiene:

$$\mathbf{A_0B_0} = s_0 = c \cdot t = n \cdot v \cdot t = n \cdot s \quad (11)$$

A esta relación directa entre el valor de s_0 y s , se le denomina Δ , y se define como **camino óptico** de un haz de luz [32]:

$$\Delta = n \cdot s \quad (12)$$

El concepto de camino óptico, es obviamente muy útil y necesario para comparar las trayectorias luminosas recorridas en distintos medios que, de otra manera, no serían comparables dado que en cada medio la luz se propaga con diferente velocidad. Sin embargo, los diferentes tramos de trayectoria pueden compararse a través de los caminos ópticos asociados a cada rayo en cada medio, dado que éstos corresponden a trayectorias todas recorridas en el vacío [31].

Así por ejemplo, si un haz de luz recorre varios tramos de trayectoria de longitudes $s_1, s_2, s_3, \dots, s_i$, en medios de índices de refracción con valores $n_1, n_2, n_3, \dots, n_i$, respectivamente, la longitud de la trayectoria total se define como:

$$l = s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_i = \sum_i s_i \quad (13)$$

Gráficamente, las diferentes trayectorias y longitudes que recorre el haz de luz que pasa a través de diferentes medios de propagación, sería el que se muestra en la figura 45:

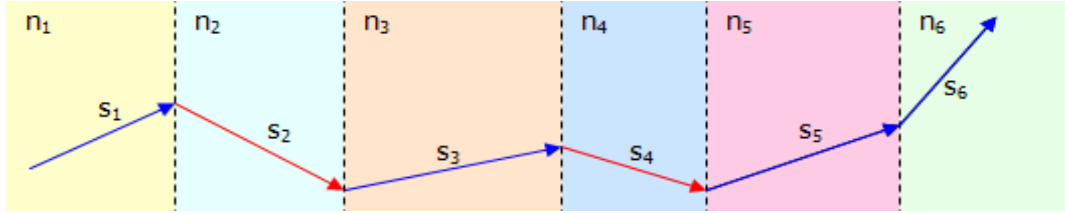


Figura 45: Trayectoria de un haz por varios medios físicos

El camino óptico realizado por el haz anterior, vendría dado por la suma de caminos ópticos de cada medio que atraviesa, y por lo tanto:

$$\Delta = n_1 \cdot s_1 + n_2 \cdot s_2 + n_3 \cdot s_3 + \dots + n_i \cdot s_i = \sum_i n_i \cdot s_i \quad (13)$$

El camino óptico Δ corresponde a la longitud de la trayectoria que la luz recorre en el vacío, en el mismo tiempo que emplea en recorrer la trayectoria de longitud l en los diferentes medios con índices de refracción $n_1, n_2, n_3, \dots, n_i$.

Sin embargo, estos cálculos realizados tan sólo son aplicables a una de las posibles propagaciones de un haz de luz determinado entre los puntos **A** y **B**. Es evidente que existen infinitas trayectorias que unen dichos puntos. Por tanto, es necesario establecer un criterio para seleccionar la trayectoria que realmente recorre el haz de luz de entre todas las posibles.

El **Principio de Fermat** [31] permite establecer, de entre todas las trayectorias imaginables, cuál es la que efectivamente recorre el haz de luz. Este principio afirma que la trayectoria real de un haz de luz es la que se asocia al camino óptico máximo, mínimo o estacionario.

Con relación al caso ilustrado anteriormente, este principio afirma que de todas las trayectorias que puedan realizarse entre los puntos **A** y **B**, la que realmente recorre la perturbación luminosa es aquella en que la luz emplea un tiempo mínimo. Por lo tanto, y para encontrar un mínimo de la función Δ , su derivada debe ser nula:

$$d\Delta = d\left(\sum_i n_i \cdot s_i\right) \quad (14)$$

Así pues, particularizando el caso anterior para dos medios diferentes, el gráfico detallado del haz del rayo sería el siguiente [32]:

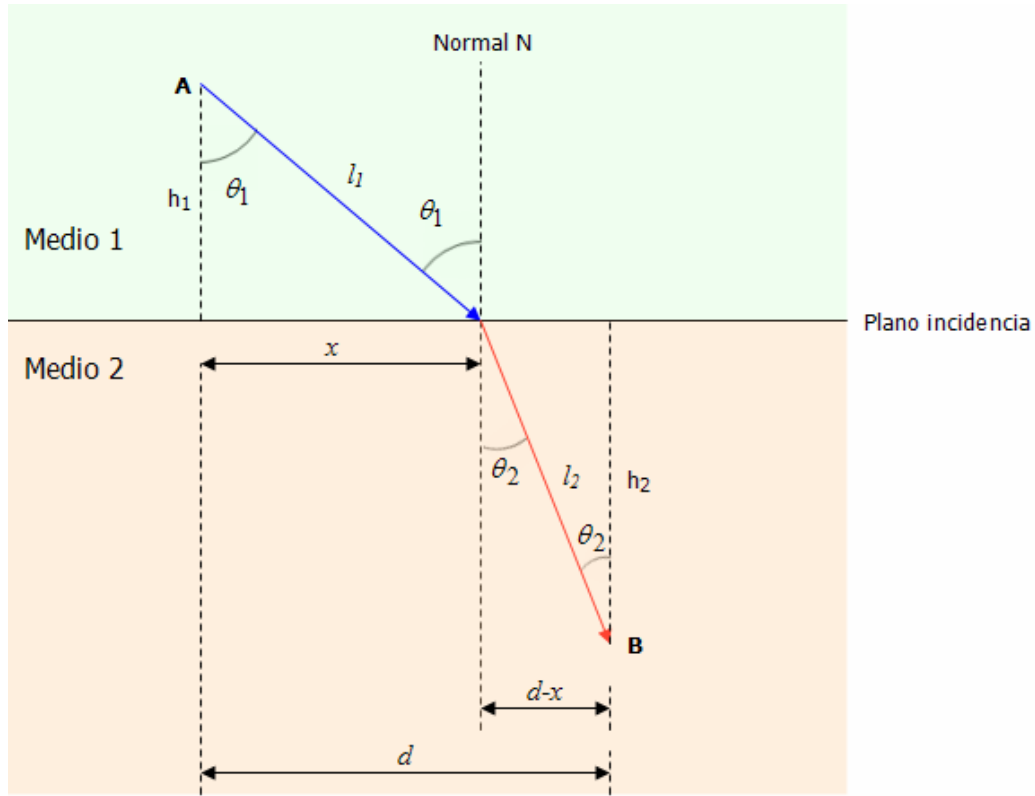


Figura 46: Explicación matemática del Principio de Fermat

En este caso l_1 y l_2 son las distancias recorridas en los medios 1 y 2 respectivamente. El tiempo que tarda la luz en recorrer el camino total desde el punto **A** hasta el punto **B**, viene dado por la suma del tiempo que tarda en recorrer l_1 y l_2 , siendo estos t_1 y t_2 respectivamente:

$$t = t_1 + t_2 = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} \quad (15)$$

Aplicando la relación (3) sobre la ecuación anterior, se puede obtener que:

$$t = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} = \frac{l_1}{c/n_1} + \frac{l_2}{c/n_2} = \frac{n_1 \cdot l_1}{c} + \frac{n_2 \cdot l_2}{c} \quad (16)$$

El Principio de Fermat afirma que el tiempo recorrido por el haz real debe ser el mínimo, en función de las distancias, es necesario buscar el mínimo de la función (16). Para ello, se deriva la función, y se iguala a cero:

$$dt = \frac{d}{dt} \left(\frac{n_1 \cdot l_1}{c} \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{n_2 \cdot l_2}{c} \right) = 0 \quad (17)$$

Puesto que la velocidad de la luz c es una constante, y los índices de refracción de los medios 1 y 2 son conocidos, y por tanto, también lo son, la ecuación anterior quedaría de la siguiente forma:

$$dt = \frac{1}{c} \left[n_1 \cdot \frac{dl_1}{dt} + n_2 \cdot \frac{dl_2}{dt} \right] = 0 \quad (18)$$

A partir de este principio, se obtienen unos resultados tremendamente interesantes para el estudio del comportamiento de los haces de luz en diferentes medios. Para este ejemplo, se puede resolver la derivada anterior, y comentar su resultado.

Volviendo al dibujo ilustrativo de la figura 46 se puede obtener los valores de l_1 y l_2 a partir del Teorema de Pitágoras:

$$\begin{aligned} l_1^2 &= h_1^2 + x^2 \\ l_2^2 &= h_2^2 + (d - x)^2 \end{aligned} \quad (19)$$

Aplicando nuevamente el Principio de Fermat, por el cuál se debe minimizar las distancias, se derivan las ecuaciones anteriores (19), y se igualan a cero:

$$\begin{aligned} \frac{dl_1^2}{dx} &= \frac{d}{dx} (h_1^2 + x^2) = 0 \\ \frac{dl_2^2}{dx} &= \frac{d}{dx} (h_2^2 + (d - x)^2) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Las derivadas anteriores quedarían de la siguiente forma, para l_1 :

$$\frac{dl_1^2}{dx} = \frac{d}{dx} (h_1^2 + x^2) = 0 \rightarrow 2l_1 \cdot \frac{dl_1}{dx} = 2x \quad (21)$$

Operando, se obtiene:

$$2l_1 \cdot \frac{dl_1}{dx} = 2x \rightarrow \frac{dl_1}{dx} = \frac{2x}{2l_1} \rightarrow \frac{dl_1}{dx} = \frac{x}{l_1} \quad (22)$$

Según el dibujo de la figura 46, y aplicando trigonometría, la relación entre x y l_1 es precisamente el seno del ángulo θ_1 , luego:

$$\frac{dl_1}{dx} = \frac{x}{l_1} \rightarrow \frac{dl_1}{dx} = \text{sen } \theta_1 \quad (23)$$

Procediendo de forma análoga para la distancia l_2 , se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{dl_2^2}{dx} = \frac{d}{dx} (h_2^2 + (d-x)^2) = 0 \rightarrow 2l_2 \cdot \frac{dl_2}{dx} = -(d-x) \cdot 2 \quad (24)$$

Operando, se obtiene:

$$2l_2 \cdot \frac{dl_2}{dx} = -(d-x) \cdot 2 \rightarrow \frac{dl_2}{dx} = -\frac{2 \cdot (d-x)}{2l_2} \rightarrow \frac{dl_2}{dx} = -\frac{(d-x)}{l_2} \quad (25)$$

Nuevamente aplicando trigonometría, la relación entre $d-x$ y l_2 es precisamente el seno del ángulo θ_2 , luego:

$$\frac{dl_1}{dx} = \frac{x}{l_1} \rightarrow \frac{dl_2}{dx} = -\text{sen } \theta_2 \quad (26)$$

Una vez obtenidos los valores de las derivadas de l_1 y l_2 se pueden sustituir dichos valores en la ecuación (18), donde la derivada del tiempo dependía a su vez, de las derivadas de dichas distancias, luego:

$$dt = \frac{1}{c} \left[n_1 \cdot \frac{dl_1}{dt} + n_2 \cdot \frac{dl_2}{dt} \right] = 0 \rightarrow dt = n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 + n_2 \cdot (-\text{sen } \theta_2) = 0 \quad (27)$$

Operando, quedaría la siguiente igualdad:

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 - n_2 \cdot \text{sen } \theta_2 = 0 \quad (28)$$

Luego el resultado final es una igualdad, que enuncia la denominada **Ley de Snell** y que se explicará detalladamente a lo largo del siguiente punto, siendo ésta [32]:

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2 \quad (29)$$

3.2.4 Reflexión y refracción

Dado un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo, incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo de composición diferente, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado en el segundo medio, donde puede o no ser absorbido. Por tanto, la refracción produce un cambio en la dirección de un rayo o haz de rayos luminosos al entrar en un medio de diferente velocidad de propagación.

El plano de incidencia se define como el plano físico formado por el rayo incidente, y la normal (es decir, el vector perpendicular a la superficie del medio) en el punto de incidencia.

Así pues, se puede afirmar que el haz de luz que incide sobre otro medio con diferente composición o velocidad de transmisión de la luz, se divide en dos subrayos,

uno reflejado dentro del primer medio, y otro refractado, que pasa al segundo medio. Este último, se quiebra en la frontera como consecuencia de la composición del medio [31].

El hecho de que un rayo se refracte, le hace cambiar, a parte del módulo y la dirección de propagación, también la velocidad y con ello la longitud de onda. A continuación, se muestra una figura donde se representa gráficamente la incidencia de un rayo sobre una superficie con diferente velocidad de propagación a la del medio por el que circula:

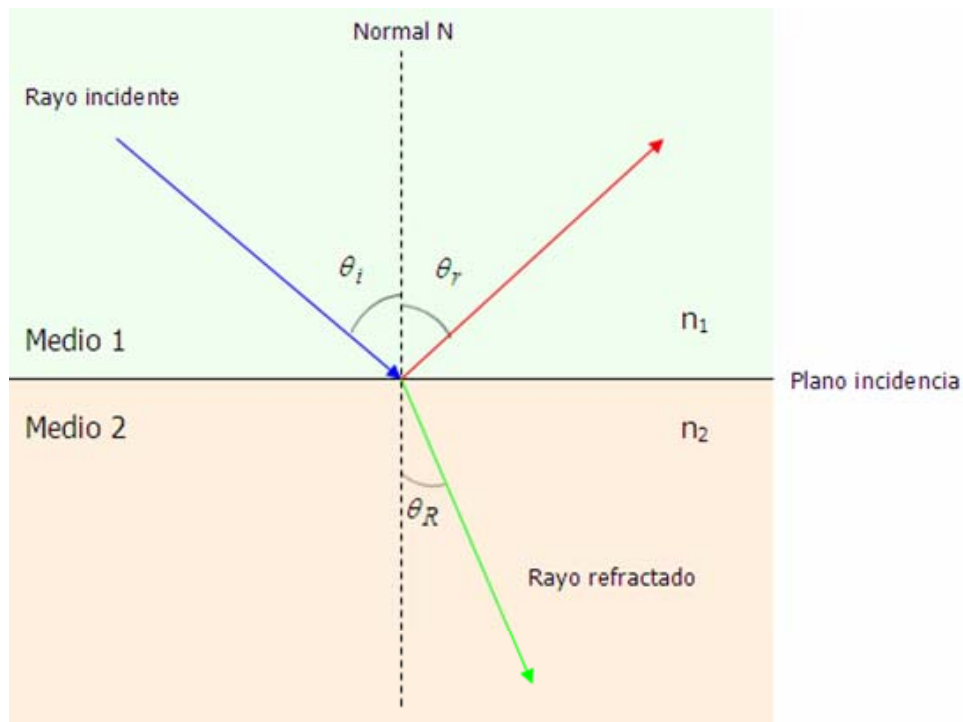


Figura 47: Ley de la reflexión y refracción

De la teoría anterior, en la que un rayo se subdivide en dos haces de luz que viajan sobre medios diferentes, se pueden extraer dos leyes fundamentales de la física óptica que cuantifican ambos sucesos: la Ley de la Reflexión, y la Ley de la Refracción, también denominada Ley de Snell.

3.2.4.1 Ley de la Reflexión

Para enunciar y demostrar la **Ley de la Reflexión** [31], se considerará un haz de luz que se propaga desde un punto genérico **A** hacia otro punto **B**, reflejándose sobre un espejo plano (y por tanto, sin reflexión existente), tal y como se indica en la siguiente figura:

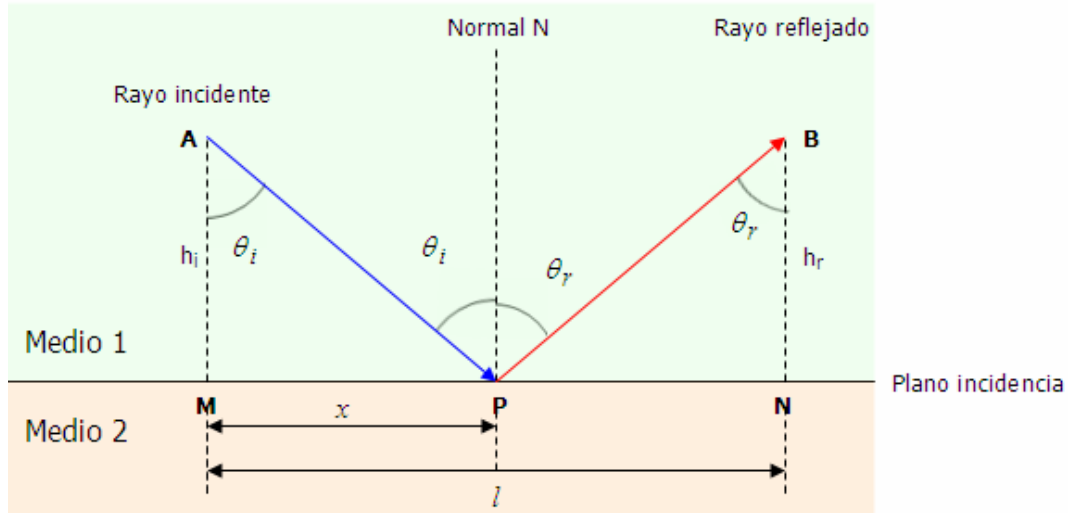


Figura 48: Ley de la reflexión

En la figura, **APB** es una de las posibles trayectorias para un haz de luz que se propaga de **A** hacia **B** reflejándose sobre el plano de incidencia, siendo éste un espejo plano. Se pueden dibujar infinitas trayectorias para el haz de luz incidente, y es claro que éstas dependen del punto del espejo en el cuál vaya a reflejarse el haz, de manera que si se determina la posición del punto **P**, se habrá determinado la trayectoria real. En la figura 48 se han trazado perpendiculares al espejo desde los puntos **A** y **B**, hasta el corte con la perpendicular, siendo éstos los puntos **M** y **N** respectivamente. Conocidos estos 4 puntos, se puede identificar la posición del punto **P** a través de su distancia x respecto al punto **M**.

Para facilitar los cálculos, se denominarán las rectas **AM** = h_i ; **BN** = h_r ; **MN** = l ; y **MP** = x , luego entonces **PN** = $l - x$. La longitud de la trayectoria **L** del haz de luz, se puede calcular ahora analíticamente como:

$$\mathbf{L} = \mathbf{AP} + \mathbf{PB} = \sqrt{h_i^2 + x^2} + \sqrt{h_r^2 + (l - x)^2} \quad (30)$$

Por otra parte, el camino óptico asociado a la trayectoria, sería el siguiente:

$$\Delta = n \cdot \mathbf{L} = n \cdot \sqrt{h_i^2 + x^2} + n \cdot \sqrt{h_r^2 + (l - x)^2} \quad (31)$$

siendo n , el índice de refracción del medio en el cuál esté sumergido el espejo sobre el que incide el rayo inicial.

Dado que la trayectoria de la luz depende de la posición del punto **P**, o sea del valor de x , se puede encontrar la trayectoria real aplicando el Principio de Fermat, es decir, imponiendo la siguiente condición de que la derivada de la función Δ sea cero:

$$\frac{d\Delta}{dx} = \frac{d}{dx} \left(n \cdot \mathbf{L} = n \cdot \sqrt{h_i^2 + x^2} + n \cdot \sqrt{h_r^2 + (l - x)^2} \right) = 0 \quad (32)$$

por lo tanto, operando quedaría la siguiente ecuación:

$$\frac{d\Delta}{dx} = -\frac{2nx}{2\sqrt{h_1^2 + x^2}} + \frac{2n(l-x)}{2\sqrt{h_2^2 + (l-x)^2}} = 0 \quad (33)$$

de donde se obtiene que:

$$\frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} = \frac{(l-x)}{\sqrt{h_2^2 + (l-x)^2}} \quad (34)$$

Aplicando la ecuación (30), se obtiene:

$$\frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} = \frac{(l-x)}{\sqrt{h_2^2 + (l-x)^2}} \rightarrow \frac{\mathbf{MP}}{\mathbf{AP}} = \frac{\mathbf{PN}}{\mathbf{PB}} \quad (35)$$

Por lo tanto, del dibujo se obtiene que:

$$\begin{aligned} \frac{\mathbf{MP}}{\mathbf{AP}} &= \text{sen } \theta_i \\ \frac{\mathbf{PN}}{\mathbf{PB}} &= \text{sen } \theta_r \end{aligned} \quad (36)$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (35) se obtiene finalmente la siguiente ecuación de igualdad:

$$\text{sen } \theta_i = \text{sen } \theta_r \quad (37)$$

Esta relación, sólo se cumple cuando los ángulos de incidencia y reflexión son iguales. Por tanto, a la condición que implica que la trayectoria real del haz de luz es la descrita por el Principio de Fermat, y por tanto $\frac{d\Delta}{dx} = 0$, se denomina **Ley de Reflexión** [31] y queda definida como:

$$\theta_i = \theta_r \quad (38)$$

Según lo expuesto anteriormente, según la Ley de la Reflexión, se puede afirmar que el ángulo de incidencia del rayo, es igual al ángulo de reflexión respecto a la normal del plano.

$$\theta_i = \theta_r \quad (39)$$

Además, esta ley afirma también que el rayo incidente i , el rayo reflejado r , y la normal N en el punto de incidencia, se encuentran en un mismo plano Π , y además, por encontrarse en el mismo medio, mantiene su velocidad y su longitud de onda.

$$i, r, N \in \Pi \quad (40)$$

Existen ciertas particularidades de esta ley, en función de la composición y características del medio sobre el que incide el rayo inicial. Así pues, si la superficie del segundo medio es lisa, entonces puede actuar como un espejo y producir una imagen reflejada. A continuación, se muestra una figura donde pone de manifiesto el comportamiento de los rayos o haces de luz que inciden sobre una superficie lisa [32]:

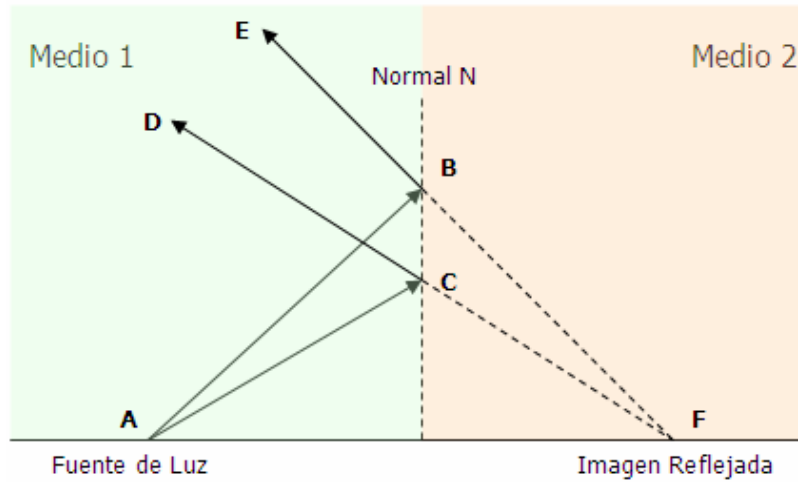


Figura 49: Reflexión en un espejo plano

Tal y como se observa en la figura 49, la fuente de luz es el objeto **A**. Dicho punto **A** emite rayos en todas las direcciones, y dos de ellos, han incidido sobre el espejo N en dos puntos: **B** y **C**. El hecho de que el medio 2 sea de superficie lisa, le permite actuar como un espejo, reflejándose los rayos incidentes y originándose los rayos **CD** y **BE**.

Para un observador situado delante del espejo, esos rayos parecen venir del punto **F** que está situado detrás del espejo. En este caso, en el que el espejo es plano, la imagen del objeto parece situada detrás del espejo, y separada de él por la misma distancia que hay entre éste y el objeto que está delante.

De las leyes de reflexión, se deduce que **CF** y **BF** forman el mismo ángulo con la superficie del espejo que **AC** y **AB**, y además, que todos los rayos, incidentes, reflejados, la normal, el foco **A** y la imagen **F**, se encuentran en el mismo plano Π :

$$\begin{aligned} \text{ang}(CF) &= \text{ang}(AC) \\ \text{ang}(BF) &= \text{ang}(AB) \end{aligned} \quad (41)$$

$$AC, AB, CE, CD, A, F, N \in \Pi \quad (42)$$

Si por el contrario, la superficie del segundo medio es rugosa, las normales a los distintos puntos de la superficie se encuentran en direcciones aleatorias. En este caso,

los rayos que se encuentren en el mismo plano al salir de una fuente puntual de luz, tendrán un plano de incidencia, y por tanto de reflexión, aleatorio. Esto hace que se dispersen y no puedan formar una imagen reflejada al otro lado [32].

3.2.4.2 Ley de la Refracción o Ley de Snell

Para enunciar y demostrar matemáticamente la **Ley de Snell**, se considerará el caso de un haz de luz que se propaga desde un punto **A** situado en un medio 1 de índice de refracción n_1 , hacia un punto **B** situado en un medio 2 de índice de refracción n_2 . Para este caso, también se pueden imaginar infinitas trayectorias, las cuales difieren por la posición del punto **P** sobre la interfase en la cual incide la luz, tal y como se indica en la siguiente figura [31]:

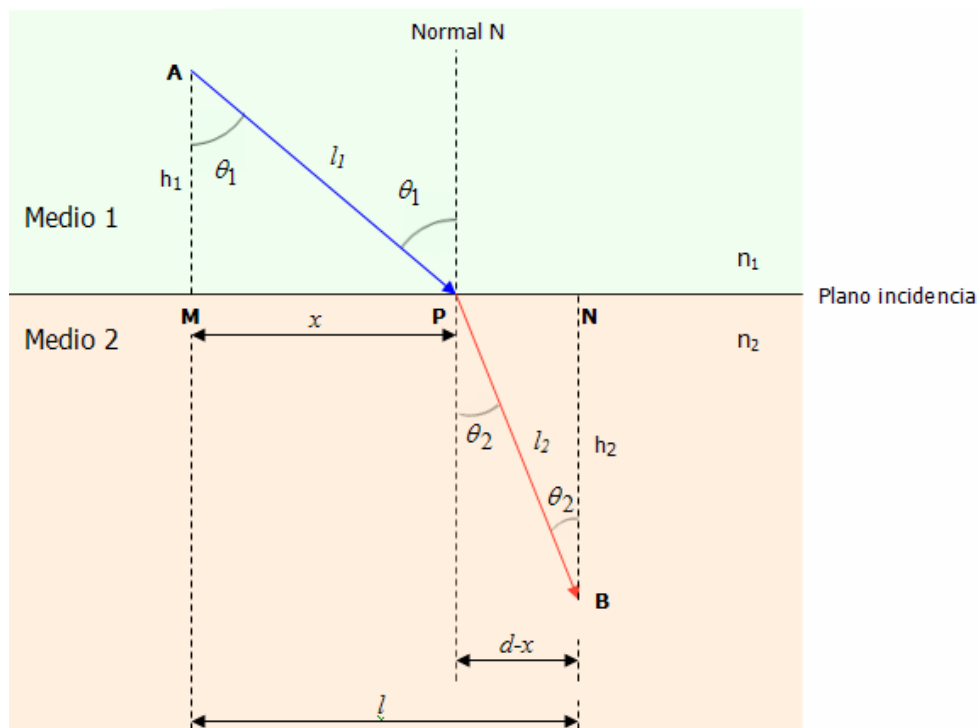


Figura 50: Ley de Snell

En la figura, **APB** es una de las posibles trayectorias para un haz de luz que se propaga de **A** hacia **B** atravesando la interfase entre dos diferentes medios de propagación.

Se han trazado perpendiculares al plano de incidencia desde los puntos **A** y **B**, hasta el corte con la perpendicular, siendo éstos los puntos **M** y **N** respectivamente. Pues conocidos estos 4 puntos, se puede identificar la posición del punto **P** a través de su distancia x respecto al punto **M**.

Para facilitar los cálculos, se denominarán las rectas **AM** = h_i ; **BN** = h_r ; **MN** = l ; y **MP** = x , luego entonces **PN** = $l - x$. La longitud de la trayectoria **L** del haz de luz, se puede calcular ahora analíticamente como:

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_2 = \mathbf{AP} + \mathbf{PB} = \sqrt{h_i^2 + x^2} + \sqrt{h_r^2 + (l-x)^2} \quad (43)$$

Por otra parte, el camino óptico asociado a la trayectoria, sería el siguiente:

$$\Delta = \sum_i n_i \cdot \mathbf{L}_i = n_1 \cdot \sqrt{h_i^2 + x^2} + n_2 \cdot \sqrt{h_r^2 + (l-x)^2} \quad (44)$$

siendo n_1 y n_2 , los índices de refracción de los medios 1 y 2 respectivamente.

Dado que la trayectoria de la luz depende de la posición del punto \mathbf{P} , o sea del valor de x , se puede encontrar la trayectoria real aplicando el Principio de Fermat, es decir, imponiendo la siguiente condición de que la derivada de la función Δ sea cero:

$$\frac{d\Delta}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\sum_i n_i \cdot \mathbf{L}_i \right) = 0 \quad (45)$$

por lo tanto, sustituyendo la ecuación (44) sobre la anterior, se obtiene:

$$\frac{d\Delta}{dx} = \frac{d}{dx} \left(n_1 \cdot \sqrt{h_i^2 + x^2} + n_2 \cdot \sqrt{h_r^2 + (l-x)^2} \right) = 0 \quad (46)$$

operando matemáticamente la derivada anterior, se obtiene:

$$\frac{d\Delta}{dx} = -\frac{2n_1x}{2\sqrt{h_1^2 + x^2}} + \frac{2n_2(l-x)}{2\sqrt{h_2^2 + (l-x)^2}} = 0 \quad (47)$$

dado que la suma de ambas fracciones ha de ser cero, se convierte la ecuación anterior en una simple igualdad de ecuaciones:

$$n_1 \cdot \frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} = n_2 \cdot \frac{(l-x)}{\sqrt{h_2^2 + (l-x)^2}} \quad (48)$$

Aplicando la ecuación (43), se obtiene:

$$n_1 \cdot \frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} = n_2 \cdot \frac{(l-x)}{\sqrt{h_2^2 + (l-x)^2}} \rightarrow \frac{\mathbf{MP}}{\mathbf{AP}} = \frac{\mathbf{PN}}{\mathbf{PB}} \quad (49)$$

Observando el dibujo de la figura 50, se puede extraer los valores de ambas fracciones, aplicando valores trigonométricos a las mismas:

$$\frac{MP}{AP} = \text{sen } \theta_i$$

$$\frac{PN}{PB} = \text{sen } \theta_r \quad (50)$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (49) se obtiene finalmente, siguiente ecuación de igualdad, que enuncia la denominada **Ley de Snell** o **Ley de la Refracción** [32]:

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_i = n_2 \cdot \text{sen } \theta_r \quad (51)$$

Así pues, la Ley de Snell afirma que el producto del índice de refracción del primer medio y el seno del ángulo de incidencia de un rayo, es igual al producto del índice de refracción del segundo medio y el seno del ángulo de refracción. Además, el rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios en el punto de incidencia están en un mismo plano Π :

$$i, r, N \in \Pi \quad (52)$$

En general, el índice de refracción de una sustancia transparente más densa, es mayor que el de un material menos denso, es decir, la velocidad de la luz es menor en la sustancia de mayor densidad. Por tanto, si un rayo índice de forma oblicua sobre un medio con índice de refracción mayor, se desviará hacia la normal, mientras que si incide sobre un medio con un índice de refracción menor, se desviará alejándose de ella [31].

El hecho de que la luz se refracte, y cambie de dirección en el espacio de propagación, se debe a una variación de su velocidad de propagación en el nuevo medio.

Como la frecuencia de vibración de la onda de luz es siempre constante, no varía al pasar de un medio a otro; lo que sí cambia es la longitud de onda de la luz como consecuencia de la variación en su velocidad.

Por lo tanto, cuando la onda incidente pasa al segundo medio y se refracta, su nueva longitud de onda viene determinada por la siguiente ecuación [32]:

$$\lambda = \frac{v_p}{f} = v_p \cdot f \quad (53)$$

En la figura 51 se muestra una tabla con los índices de refracción de algunos medios más comunes de propagación de la luz [34]:

Sustancia	Índice de Refracción
Vacío	1
Aire (*)	1,00029
Agua (**)	1,333
Hielo	1,309
Diamante	2,417
Acetona	1,36
Alcohol etílico	1,36
Solución de azúcar al 30%	1,38
Glicerina	1,473
Solución de azúcar al 80%	1,52
Benceno (**)	1,501
Alcohol metílico (**)	1,329
Tetracolorro de carbono	1,460
Trementina	1,472
Cuarzo	1,544
Zircón	1,923
Vidrio Crown	1,52
Vidrio Flint ligero	1,58
Vidrio Flint medio	1,62
Vidrio Flint denso	1,66
Plexiglas	1,51

Figura 51: Índices de refracción de varios medios

En la figura 52 se muestra la trayectoria de un rayo de luz que atraviesa varios medios con superficies de separación paralelas.

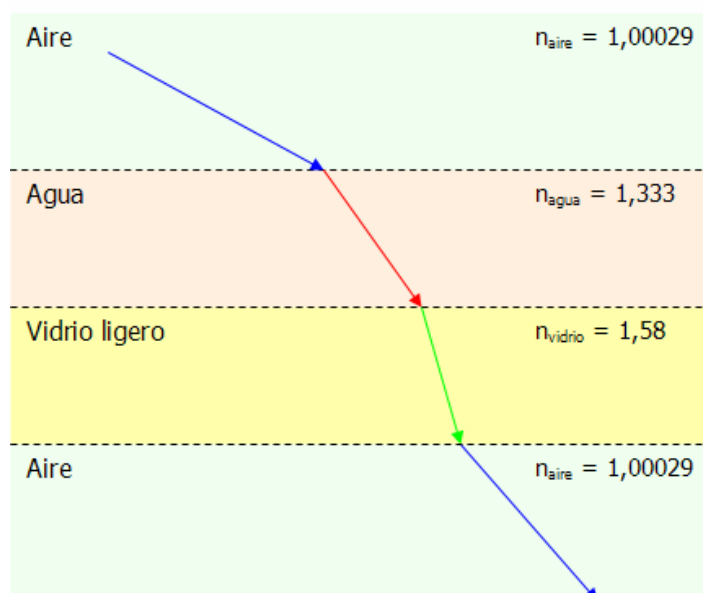


Figura 52: Refracción de un rayo atravesando diferentes medios

Tal y como se puede observar en la figura anterior, el rayo inicial cuyo medio de propagación es el aire, incide sobre el agua, variando la velocidad de propagación del haz de luz, y por tanto, su dirección de propagación. Este hecho se repite a medida que atraviesa los diferentes medios con distintos índices de refracción cada uno, modificando la trayectoria del rayo luminoso en función de ellos.

Se puede por tanto, subdividir la refracción de un rayo en función de la diferencia de índices de refracción existente entre el medio inicial de propagación, y el medio final de incidencia o refracción, tal y como se indica en la figura siguiente:

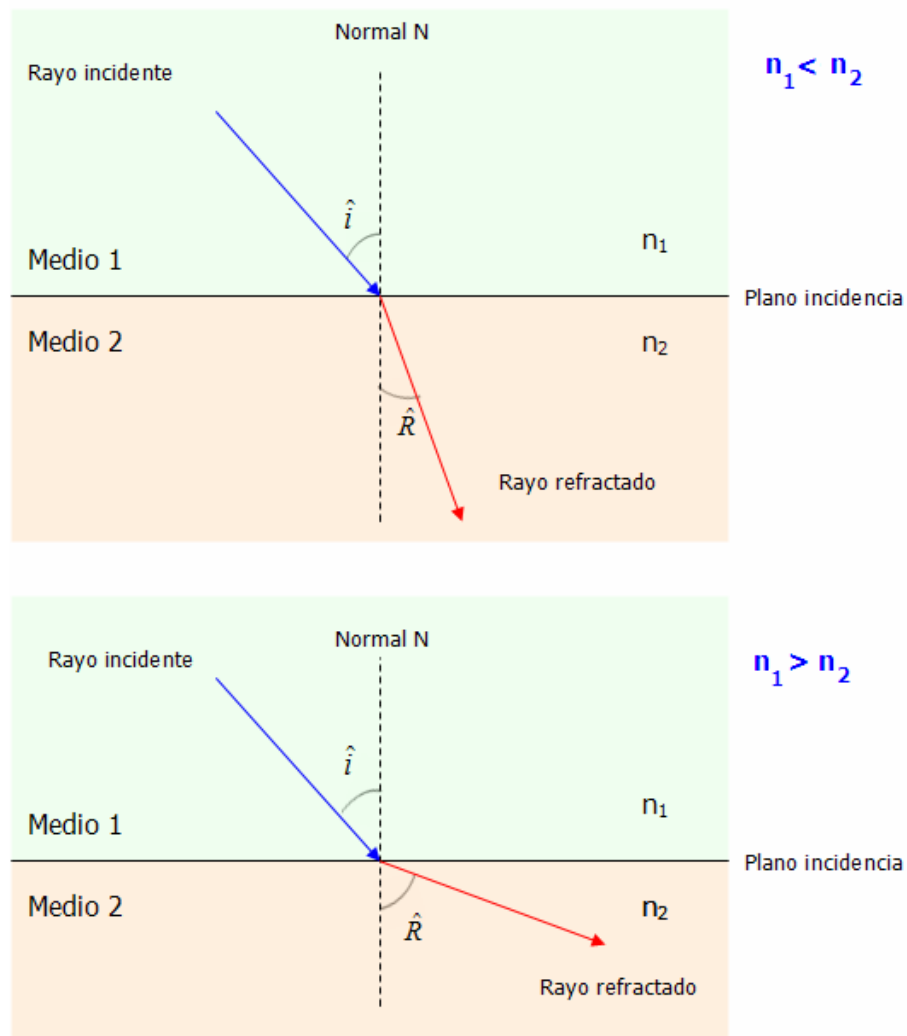


Figura 53: Ley de Snell o Ley de la Refracción

Para un observador situado en un medio menos denso, como el aire, un objeto situado en un medio más denso parece estar más cerca de la superficie de separación de lo que está en la realidad. El ejemplo habitual es el de un objeto sumergido en una piscina o en el mar, observado desde encima del agua, tal y como se muestra en la figura que viene a continuación [32].

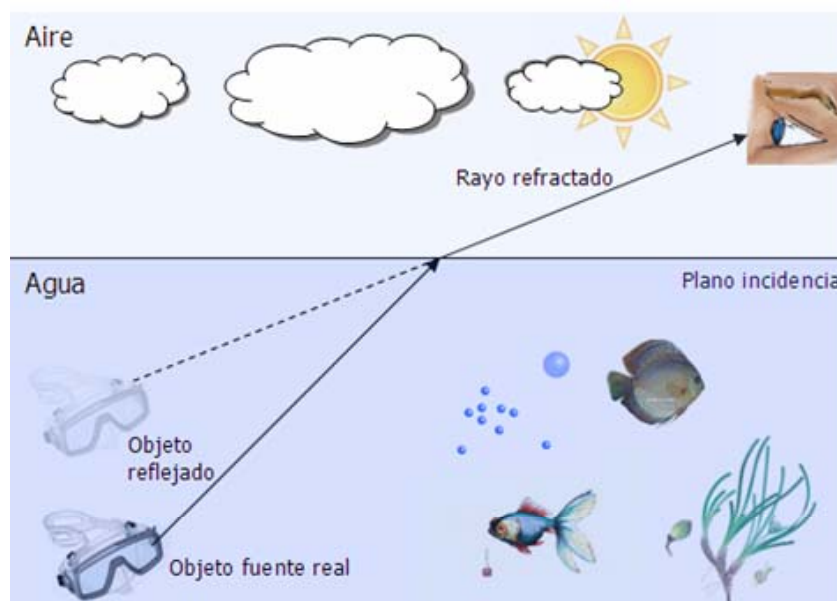


Figura 54: Refracción entre los medios aire y agua

Tal y como se puede observar en figura 54, el rayo procedente del objeto fuente, se desvía acercándose a la normal de incidencia, es decir, hacia el ojo. Por ello, el objeto parece situado en un punto más cercano de la superficie de lo que realmente está.

3.2.4.3 Reflexión Total

El concepto de reflexión total, viene asociado a la Ley de la Reflexión detallada en el apartado anterior. Si bien, puede considerarse un caso particular de reflexión, es muy importante dada la cantidad de aplicaciones físicas y técnicas basadas en este concepto.

Para poder explicar y demostrar el concepto de reflexión total, es necesario considerar nuevamente un caso práctico, de dos medios con índices de refracción n_1 y n_2 respectivamente, donde $n_2 < n_1$. Dada una fuente de luz localizada en el medio de mayor índice de refracción, se analizará analíticamente qué ocurre cuando la luz incide sobre la interfase entre los dos medios en condiciones límites.

De acuerdo con la Ley de Snell, $n_1 \cdot \sin \theta_i = n_2 \cdot \sin \theta_r$, y dada la condición de partida que $n_2 < n_1$, el ángulo de refracción θ_r resulta siempre mayor que el ángulo de incidencia θ_i ; esto implica que existe un valor $\theta_{i \text{ lim}}$ límite, para el cuál, el ángulo de refracción resulta ser $\theta_r = 90^\circ$, es decir, cuando el rayo refractado, es paralelo al plano de incidencia o interfase.

Gráficamente, la situación anterior se puede representar bajo el esquema de la figura 55:

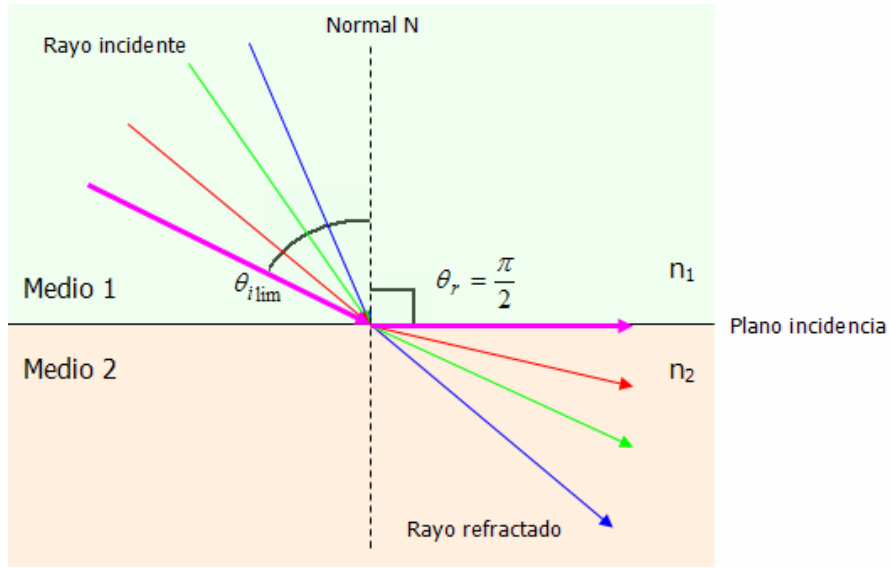


Figura 55: Ángulo límite para la reflexión total

Siguiendo el patrón de transmisión tal y como se indica en la figura anterior, para ángulos de incidencia mayores de que el ángulo límite $\theta_{i\lim}$ según la Ley de Snell, se obtendrían valores del $\sin\theta_r > 1$, lo cual es matemáticamente imposible.

Por lo tanto, cuando un rayo incide con un ángulo de incidencia $\theta_i > \theta_{i\lim}$, experimentalmente se observa que estos rayos se reflejan completamente en el medio de índice de refracción n_2 , es decir, que la interfase para esos rayos se convierte en un espejo perfecto, en el sentido que la luz no puede transmitirse al medio de índice de refracción n_1 [31].

El valor del ángulo límite para el cual se produce la reflexión total, se puede calcular fácilmente con la siguiente condición [31]:

$$\theta_i = \theta_{i\lim} \Leftrightarrow \sin\theta_r = \frac{\pi}{2} \quad (54)$$

Si se aplica esta condición en la ecuación de la Ley de Snell, se obtiene el siguiente resultado:

$$n_1 \cdot \sin\theta_i = n_2 \cdot \sin\theta_r \rightarrow n_1 \cdot \sin\theta_{i\lim} = n_2 \cdot \sin\frac{\pi}{2} \quad (55)$$

dado que el $\sin\frac{\pi}{2} = 1$, entonces la igualdad anterior se puede simplificar como:

$$n_1 \cdot \sin\theta_{i\lim} = n_2 \quad (56)$$

El valor de $\theta_{i\lim}$ para el cual se produce la condición anterior, sería [31]:

$$\theta_{i\lim} = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (57)$$

Así pues, cualquier valor del ángulo de incidencia que supere el valor obtenido a partir de la definición de ángulo límite, no tendrá una solución analítica real. La resolución entonces de este caso, se puede explicar gráficamente según la figura 56, en la que se observa que el plano de incidencia o la normal, actúa a modo de espejo:

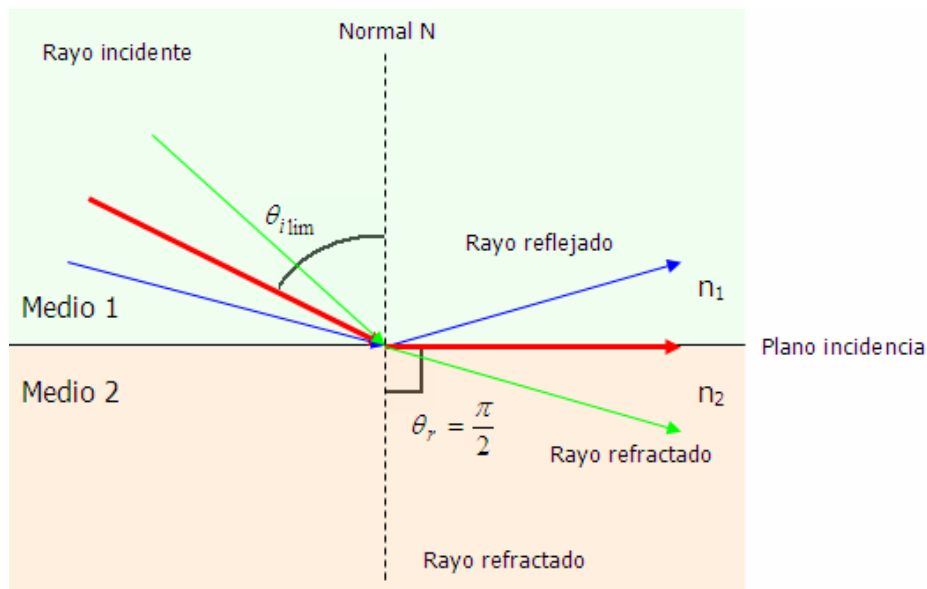


Figura 56: Ángulo límite entre dos medios con distinto índice de refracción

Tal y como se observa en la figura, el haz de luz roja que incide sobre la normal, lo hace sobre un medio de índice de refracción $n_2 < n_1$, y además lo hace con un ángulo de incidencia tal, que produce que el rayo refractado en el medio 2 tenga un ángulo de refracción de 90° .

El haz de luz de color verde, incide sobre el medio 2 con un ángulo de incidencia menor al ángulo límite, luego se refracta normalmente, con un ángulo dado por la Ley de Snell. Sin embargo, el haz de luz azul, incide sobre el segundo medio con un ángulo mayor al ángulo límite, lo que provoca que el medio 2 actúe a modo de espejo, reflejando el total de luz del rayo incidente, y además, cumpliendo la Ley de la Reflexión, es decir, que el ángulo incidente del medio 1, coincide con el ángulo del rayo reflejado del medio 2.

En el ámbito que interesa al presente proyecto, cabe destacar que la fibra óptica es una nueva aplicación práctica de la reflexión total. Así pues, cuando la luz entra por un extremo de un tubo macizo de vidrio o plástico, puede verse reflejada totalmente en la superficie exterior del tubo, y tras una serie de reflexiones totales sucesivas, salir por el otro extremo.

Es posible fabricar fibras de vidrio de diámetro muy pequeño, recubrirlas con un material de índice de refracción menor y posteriormente juntarlas, en haces flexibles o placas rígidas que se utilizan para retransmitir imágenes.

Los haces flexibles, que pueden emplearse para iluminar además de para transmitir imágenes, son muy útiles para la exploración médica, ya que pueden introducirse en cavidades estrechas e incluso en vasos sanguíneos.

Todas estas características, así como otras aún más relevantes, se detallarán a lo largo de los siguientes apartados, donde se expondrá la relevancia de la óptica geométrica como método de propagación de señal a través de la fibra óptica.

3.3. Transmisión de señales a través de fibra óptica

Tal y como se ha especificado en el apartado de características generales de la fibra óptica, ésta consiste en un filamento transparente de diámetro fijo cubierto de un revestimiento exterior de material plástico.

La transmisión de señales a través de fibra óptica, se basa principalmente en el transporte de pulsos luminosos a través de dicho filamento, procedentes de la transformación previa de señales eléctricas utilizando los denominados transmisores optoelectrónicos.

Para poder entender el comportamiento y funcionamiento de la fibra óptica como canal transmisor de luz, es necesario conocer previamente su estructura. A continuación, se detalla la geometría física de un cable de fibra óptica común o normal, base para la fabricación de cualquier tipo de fibra del mercado.

3.3.1. Composición y geometría de una fibra óptica

La geometría física de la fibra óptica y el índice de refracción son las claves necesarias que condicionan el funcionamiento general, comportamiento y ancho de banda de los diferentes tipos de fibra óptica. No obstante, todas y cada una de ellas, comparten una estructura genérica, que permite la transmisión en general.

Toda fibra óptica está constituida por tres estructuras o capas concéntricas, que difieren en sus propiedades de composición, y son las que se detallan a continuación [35].

3.3.1.1. Núcleo (*Core*)

El núcleo, también conocido como túnel transmisor, es la parte más interna de la fibra y se encarga de conducir las señales ópticas procedentes de la fuente de luz hasta el dispositivo de recepción. Se trata de una sola fibra continua de vidrio fabricada a elevada temperatura a partir de cuarzo ultra puro, plástico o dióxido de silicio. Frecuentemente, el vidrio de sílice (SiO_2) suele doparse con materiales como óxido de fósforo (P_2O_5), óxido de germanio (GeO_2) u óxido de boro (B_2O_3) para ajustar su índice de refracción.

Posee un diámetro muy pequeño, que varía entre los 10 y 300 μm . Cuanto mayor es el diámetro del núcleo, mayor es la cantidad de luz que el cable puede transportar. Precisamente, los cables de fibra óptica se clasifican a nivel general en función de su diámetro.

3.3.1.2. Revestimiento (*Cladding*)

Es la parte intermedia de la fibra, que rodea y protege al núcleo. Este medio posee un índice de refracción menor al del núcleo, de forma que actúa como una capa reflectante (a modo de espejo), consiguiendo que las ondas de luz que intentan escapar del núcleo sean reflejadas y retenidas en el mismo.

Está fabricado a elevada temperatura con base en silicio de naturaleza cristalina, y generalmente son de cuarzo o plástico transparente. En esta capa se suelen añadir varias capas de plástico con el fin de absorber los posibles impactos o golpes que pueda recibir la fibra y proporcionar una protección extra contra curvaturas excesivas del cable, es decir, para preservar la fuerza de la fibra.

3.3.1.3. Recubrimiento (*Coating o Buffer*)

El recubrimiento es la parte externa de la fibra y actúa a modo de amortiguador, protegiendo el núcleo y el revestimiento de posibles daños y agentes externos. En definitiva, provee al cable de cierta protección mecánica a la manipulación. Está fabricado con material plástico, capaz de resguardar la fibra óptica de la humedad, el aplastamiento, los roedores y otros riesgos del entorno.

En muchas ocasiones el recubrimiento aparece claramente dividido a su vez en dos subcapas: el recubrimiento primario (*buffer*) y el recubrimiento secundario (*coating*). En aquellos casos en los que el recubrimiento primario lleva otro adicional secundario, la fibra suele utilizarse para exterior o bajo tierra.

Esta funda puede retirarse fácilmente por medios físicos o mecánicos con el fin de realizar empalmes y le otorga a la fibra un diámetro externo prefijado, pudiendo ser de 125, 250, (en caso de sólo contar con único recubrimiento primario) y de 500 o 900 μm (en caso de contar también con un recubrimiento secundario adicional).

A continuación, se muestra una figura con la sección de un cable de fibra óptica básico, donde se pueden apreciar las tres capas concéntricas descritas anteriormente [35].

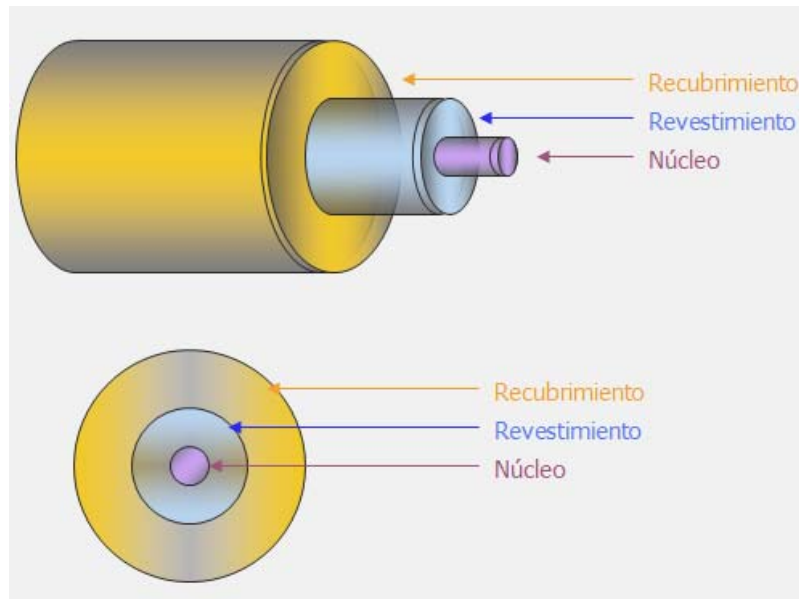


Figura 57: Geometría física de la fibra óptica

Por último, cabe destacar que las fibras ópticas no suelen presentarse como cables aislados, sino que suelen fabricarse como estructuras agrupadas bajo una misma cubierta, cuya clasificación se expondrá más adelante.

3.3.2. Principio de funcionamiento de la fibra óptica

Es primordial tener en cuenta que, para que sea posible la transmisión de información a través de la fibra óptica, es necesario inyectar en la misma haces de luz a partir de una fuente lumínica de referencia.

Concretamente, los pulsos de luz entrantes en el cable lo hacen directamente sobre el núcleo de la fibra, y consiguen transmitirse a través de él rebotando en las paredes de revestimiento envolvente del núcleo. Esto es posible gracias a la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento, dado que el índice de refracción del revestimiento es menor al del núcleo. Finalmente, los rayos luminosos llegan al extremo opuesto de la fibra, donde un receptor los termina transformando en señales eléctricas [25].

Para poder obtener los índices de refracción distintos entre el revestimiento y el núcleo, y poder dar lugar a la clasificación anterior y satisfagan las condiciones de guía de luz, se suelen agregar impurezas al silicio (Si_2O_3) durante el proceso de fabricación. Dichas impurezas suelen ser materiales dopantes tales como el óxido de fósforo (P_2O_5), el óxido de germanio (GeO_2) o el óxido de boro (B_2O_3), que aumentan el índice de refracción [35].

En definitiva, el principio operacional de la fibra óptica está basado en el Principio de la reflexión total, explicado y demostrado teóricamente en el apartado anterior. El transmisor emite rayos de luz con un ángulo de incidencia superior al ángulo crítico, permitiendo que el rayo transmitido se refleje por primera vez en el revestimiento.

Este mismo proceso se repite reiteradamente a lo largo de todo el cable. Dado que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales, el rayo de luz continúa reflejándose y transmitiéndose en zigzag sobre toda la longitud de la fibra. De esta forma, la energía luminosa procedente de la fuente transmisora es atrapada en el núcleo.

Sin embargo, no todos los haces de luz procedentes de la fuente de energía lumínica entran en el núcleo, o bien entran pero no consiguen transmitirse a través de reflexiones internas en la fibra. Esto se debe a que la luz que golpea las interfaces núcleo-revestimiento lo hace con un grado menor al ángulo crítico, perdiéndose por refracción dicha energía en el revestimiento.

A continuación se muestra de forma esquemática el principio de propagación a través de fibra óptica [30]:

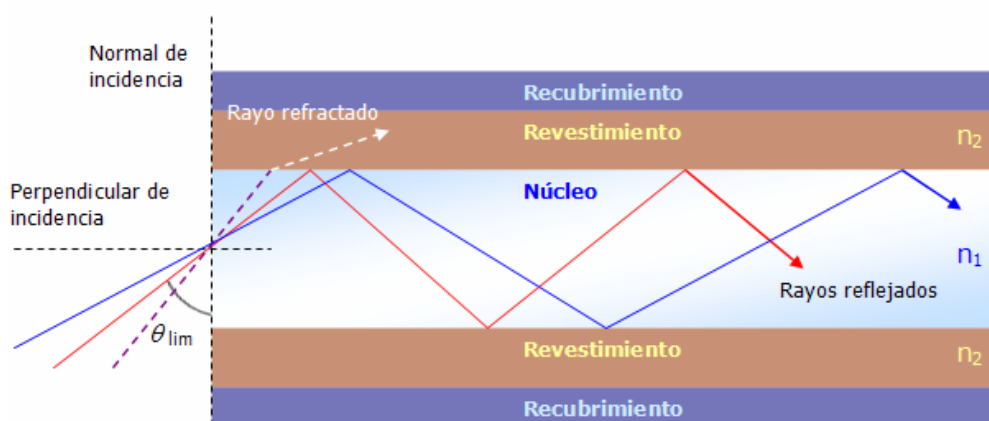


Figura 58: Principio de operación de la fibra óptica

En la figura 58, se toman como referencia tres rayos con diferentes ángulos de incidencia sobre el núcleo de la fibra, y que además cumple que $n_2 < n_1$: un rayo cuyo $\theta_{incidencia} = \theta_{lim}$, y que aparece representado en color rojo; un segundo rayo cuyo valor de $\theta_{incidencia} > \theta_{lim}$, representado en color azul; y finalmente, un rayo cuyo $\theta_{incidencia} < \theta_{lim}$, y que aparece representado mediante línea discontinua.

Los dos primeros cumplen la Ley de la Reflexión Total por lo que quedan confinados en el núcleo, mientras que el rayo discontinuo posee un ángulo de incidencia menor al ángulo límite, y es refractado sobre el revestimiento, perdiéndose dicha energía.

Si extrapolamos a la estructura cilíndrica de la fibra la condición geométrica de que todos aquellos rayos de luz que inciden bajo un ángulo superior al ángulo límite quedan atrapados dentro del núcleo, se genera un cono virtual denominado **cono de aceptación** y que determina el “conducto de paso” a la fibra. Esto es, los rayos de luz que inciden sobre la fibra fuera del cono de aceptación, no se propagan longitudinalmente a través del cable [30].

El cono de aceptación está directamente relacionado con los materiales de fabricación de la fibra, de tal forma que en función de la pureza y/o diámetro del núcleo

y revestimiento, el cono de aceptación puede ser mayor o menor. Gráficamente, se puede representar de la siguiente forma [35]:

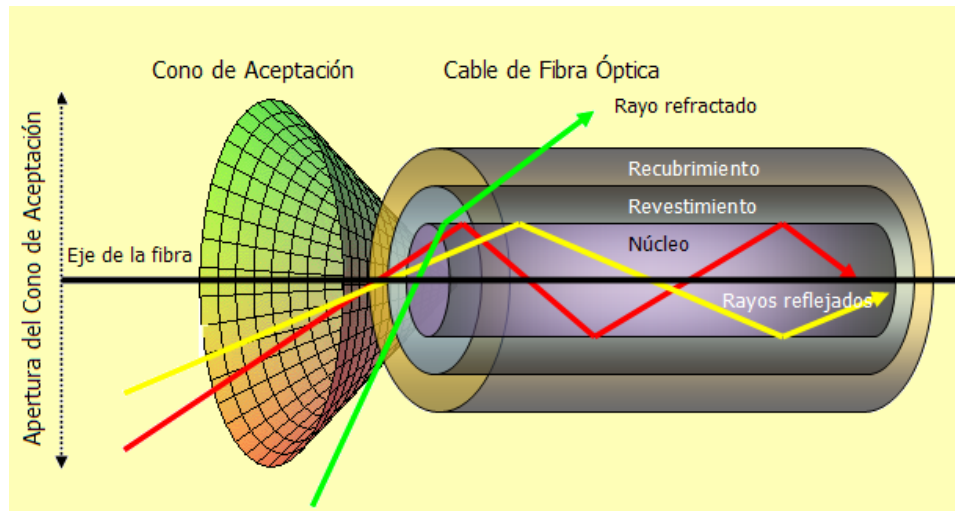


Figura 59: Cono de aceptación de la fibra óptica

Cuanto mayor sea el cono de aceptación de una fibra óptica, mayor será la cantidad de rayos que puede transmitir dicho medio, y por tanto, no será necesaria tanta precisión a la hora de la emisión de luz por parte del transmisor. En contrapartida, una mayor cantidad de haces de luz circulante por el interior del núcleo de la fibra, implica una variabilidad en las direcciones de propagación de los rayos, y la calidad de los mismos disminuye.

3.3.3. Clasificación y tipos de fibra óptica

Ningún diseño de fibra satisface todos los requerimientos operacionales por completo. Por razones económicas los fabricantes han concentrado sus esfuerzos en varios tipos de fibra óptica que se clasifican atendiendo a diferentes criterios, aunque las principales clasificaciones son tres:

- según el modo de propagación
- según el índice de refracción
- según los materiales de fabricación

Sin embargo, comúnmente se adopta una clasificación única que integra los tres criterios anteriores, y que sigue el esquema que se presenta a continuación [30] [35].

Fibras Ópticas	Según el modo de propagación	Multimodo	Según el índice de refracción	Salto de índice o índice escalonado
				Índice gradual
		Monomodo	Según los materiales de fabricación	SMF o estándar
				DSF o de dispersión desplazada
				NZ-DSF o de dispersión desplazada no nula

Figura 60: Criterios de clasificación de la fibra óptica

A continuación se detallarán los diferentes tipos de fibra óptica según la clasificación de la tabla anterior.

3.3.3.1. Fibra Óptica Multimodo o MM (*Multi Mode*)

Tal y como su nombre indica, en este tipo de fibras se pueden propagar varios modos de transmisión simultáneamente. Esto es posible gracias a que el diámetro del núcleo de este tipo de fibras es amplio, y suele ser de 50 μm ó 62.5 μm , por lo que el acoplamiento de la luz en sus diferentes modos es más sencillo. En la siguiente figura se muestra la sección de una fibra óptica multimodo [35].

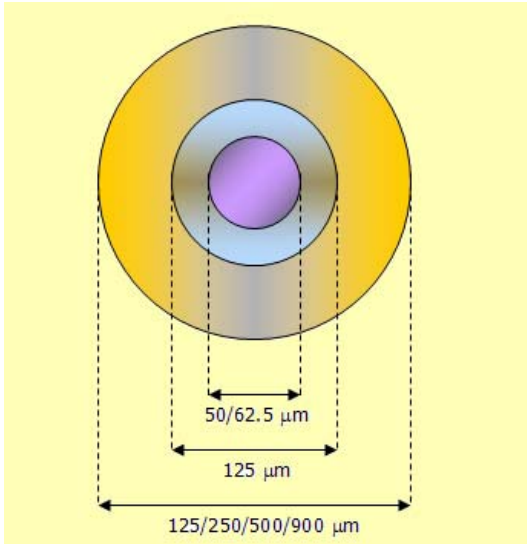


Figura 61: Sección de fibra óptica multimodo

A su vez, las fibras ópticas multimodo, se clasifican en función del índice de refracción del núcleo en multimodal de índice escalonado y multimodal de índice gradual, que se detallan a continuación.

- ***Fibra óptica multimodo de índice escalonado o salto de índice***

En este grupo se engloban todas aquellas fibras en las cuales el valor del índice de refracción en el núcleo y en el revestimiento permanece siempre constante, y además el valor del índice de refracción del núcleo es sensiblemente mayor al del revestimiento, por lo que el cambio de índice de refracción al pasar de una zona a otra cambia bruscamente (de ahí su nomenclatura) [28].

Estas fibras están fabricadas a partir de vidrio o plástico, con una atenuación de hasta 30 dB/km o 100 dB/km respectivamente para cada composición, y con una banda de paso común en ambas de hasta 40 MHz por kilómetro.

En este tipo de fibra viajan varios haces ópticos cada uno con una dirección de propagación diferente a las demás, lo que provoca que se reflejen a diferentes ángulos en el interior del núcleo. Estos haces de luz recorren diferentes distancias describiendo trayectorias rectilíneas, y como consecuencia de ello se desfasan al viajar por dentro de la fibra. El desfase de los haces de luz, causa que el pulso luminoso del que proceden se transmita al receptor con un ensanche en el tiempo. A esta distorsión de la señal se la denomina dispersión modal o dispersión multimodo, y se detallará más adelante.

Gracias al amplio diámetro del núcleo, estas fibras gozan de un cono de aceptación bastante amplio lo que permite la entrada de mayor número de haces de luz en diferentes direcciones. Debido a esto, es muy común utilizar LED como emisores de superficie de bajo costo, así como conectores de fibra muy baratos, que minimizan el impacto económico final.

Las fibras de índice escalonado se comenzaron a diseñar con diámetros estándares, que han sido de 50 μm y 62.5 μm con para el núcleo y de 125 μm para el revestimiento. Debido a su dispersión intermodal son muy utilizadas en enlaces de corta distancia, de hasta 1 km y su aplicación más importante está en las redes locales. Sin embargo, existen algunas fibras fabricadas con núcleo de 100 μm y revestimiento 125 μm , consiguiéndose un aumento de los modos de propagación, por lo que resultan útiles en aplicaciones domésticas o de muy corta distancia [35].

A continuación se muestra en la figura 62 el principio operacional de las fibras ópticas multimodo de salto de índice [35].

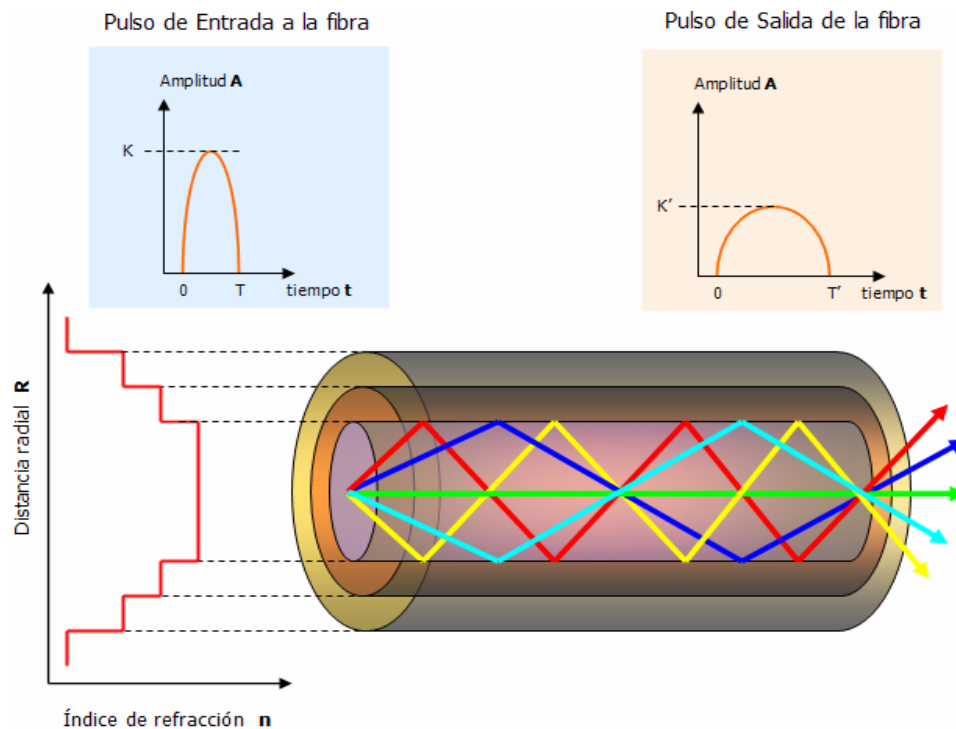


Figura 62: Fibra óptica multimodo de salto de índice

▪ Fibra óptica multimodo de índice gradual

En este tipo de fibra óptica el núcleo no posee un índice de refracción constante, sino que está fabricado a partir de varias capas concéntricas de material óptico con índices de refracción de valor decreciente desde el centro hasta el exterior, y además siempre de mayor valor al índice de refracción del revestimiento [30].

Estas fibras poseen una banda de paso que puede alcanzar los 500 MHz por kilómetro. Además, consiguen reducir considerablemente la dispersión respecto a la fibra multimodo de índice escalonado como consecuencia de la naturaleza de su composición variable del núcleo.

El número de modos de propagación o haces de luz diferentes que viajan en el interior del núcleo es menor, dado que el núcleo enfoca los rayos de luz hacia el eje de la fibra a lo largo de su trayectoria. Los haces de luz describen direcciones onduladas, por lo que la distancia recorrida por los haces en el interior del núcleo es menor, existiendo menos diferencia entre los caminos recorridos por los rayos. Debido a esto, los haces tienen a llegar al mismo tiempo, y este hecho permite reducir la dispersión intermodal.

Como consecuencia de lo anterior, admiten distancias de propagación mayores que las multimodales de índice escalonado, pudiendo llegar hasta enlaces de 10 km de distancia.

Las fibras de índice gradual se comenzaron a diseñar especialmente para las telecomunicaciones, y por largo tiempo los diámetros estándares han sido de 50 μm y

62.5 μm con para el núcleo y de 125 μm para el revestimiento. Sin embargo, existen algunas fibras fabricadas con núcleo de 82.5 μm y revestimiento 125 μm , consiguiéndose una reducción de los modos de propagación, y por lo tanto, reduciendo la dispersión intermodal [35].

A continuación se muestra en la figura 63 el principio operacional de las fibras ópticas multimodo de índice gradual [35].

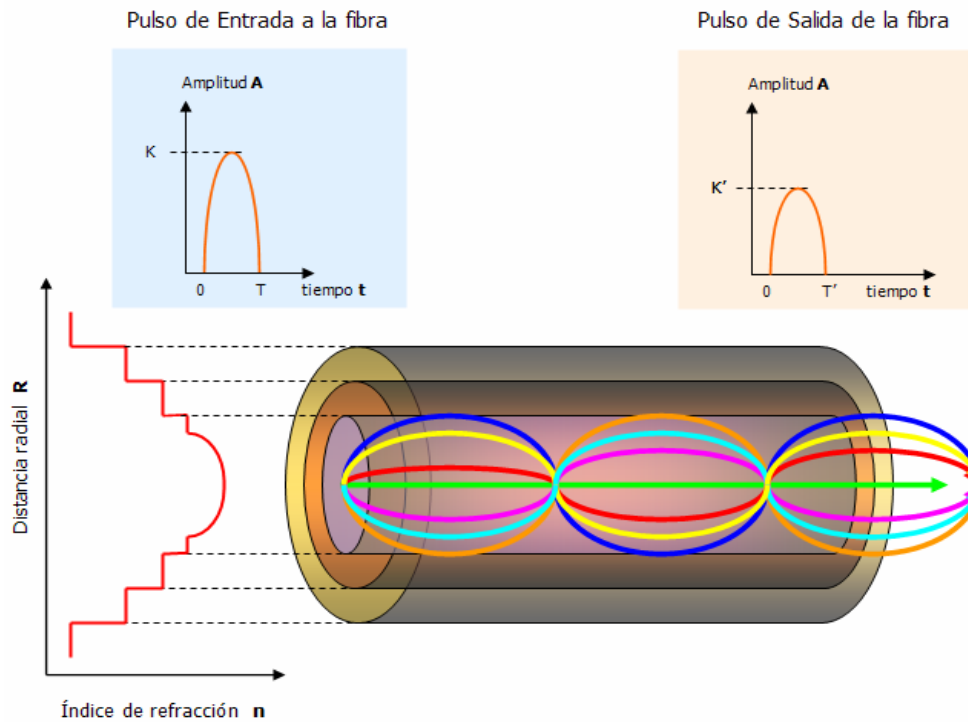


Figura 63: Fibra óptica multimodo de índice gradual

Existe un tipo de fibras ópticas dentro de las fibras multimodo denominadas fibras ópticas de plástico o **POF** (*plastic optical fiber*). Su principal característica es su núcleo, cuyo diámetro es del orden de 1 mm. Debido a esto, poseen un cono de aceptación muy amplio, lo que lleva implícito una atenuación también elevada que puede llegar a ser de 0,15 dB a 650 nm, y por supuesto un ancho de banda de transmisión muy reducido [35].

Su aplicación más común es la de enlaces de muy corta distancia, como pueden ser en el interior de automóviles, en pequeñas oficinas, etc. empleando como fuente de transmisión un LED rojo.

Las principales ventajas de su utilización son su reducido coste, su facilidad de manipulación y manejo, su simpleza en instalación y su robustez. Las pérdidas debidas a su curvatura son prácticamente inexistentes con radios de hasta 25 mm, lo que facilita su instalación en paredes y lugares muy estrechos.

3.3.3.2. Fibra Óptica Monomodo o SM (*Single Mode*)

Tal y como su nombre indica, en este tipo de fibras tan sólo permite la propagación de un único modo de transmisión. Esto es posible gracias a que el diámetro del núcleo de este tipo de fibras es muy reducido, y suele estar comprendido entre $8\text{ }\mu\text{m}$ y $10\text{ }\mu\text{m}$, por lo que tan sólo permite la propagación de un haz de luz fundamental. En la siguiente figura se muestra la sección de una fibra óptica monomodo [30].

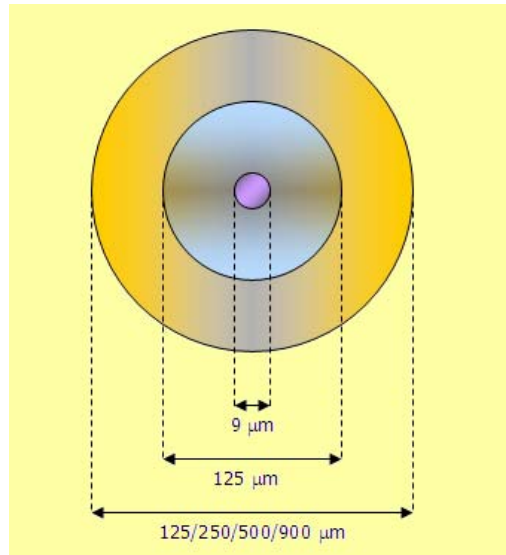


Figura 64: Sección de fibra óptica monomodo

Debido a la geometría de su reducido núcleo y por lo tanto a la transmisión de un único modo de propagación, éste se propaga directamente sin existir reflexiones en su interior, es decir el haz de luz posee una trayectoria paralela al eje de la fibra, eliminando el desfase o ensanchamiento del pulso en recepción y en consecuencia, la dispersión modal. Este efecto causa que su ancho de banda sea muy elevado, del orden de los 100 GHz por kilómetro.

Aunque consiguen extinguir la dispersión modal, estas fibras se ven afectadas por otro tipo de dispersión que es la cromática. La dispersión cromática es aquella producida por la fuente de luz como consecuencia de la coherencia espectral de la misma. No existen fuentes de luz ideales con ancho de banda nulo y coherencia infinita, sino que siempre se emiten distintas longitudes de onda residuales en torno a una longitud de onda fundamental [28].

La fabricación del núcleo se lleva a cabo a través de un material cuyo índice de refracción es sensiblemente mayor al del revestimiento, lo que lleva a definirla como una fibra de salto de índice o índice escalonado.

Los elevados flujos que se pueden alcanzar con este tipo de fibra (del orden de cientos de Gbps), la convierten en una fibra muy atractiva para demandas de tasa de bits elevadas. Esto unido a su inexistente dispersión modal, la convierten en la fibra idónea para enlaces de larga distancia.

Sin embargo, sus pequeñas dimensiones implican un manejo muy delicado y entrañan dificultades de conexión, lo que supone un aumento del coste. Además, como consecuencia de tener un diámetro del núcleo muy pequeño, su cono de aceptación también lo es, y los emisores de luz que debe tener han de transmitir un rayo muy preciso y estrecho para un acoplamiento perfecto, por lo que no se pueden utilizar LEDs (que son muy económicos) sino que es necesario emplear láseres que son más caros.

En la figura 65 se muestra gráficamente el principio operacional de las fibras ópticas monomodo [36].

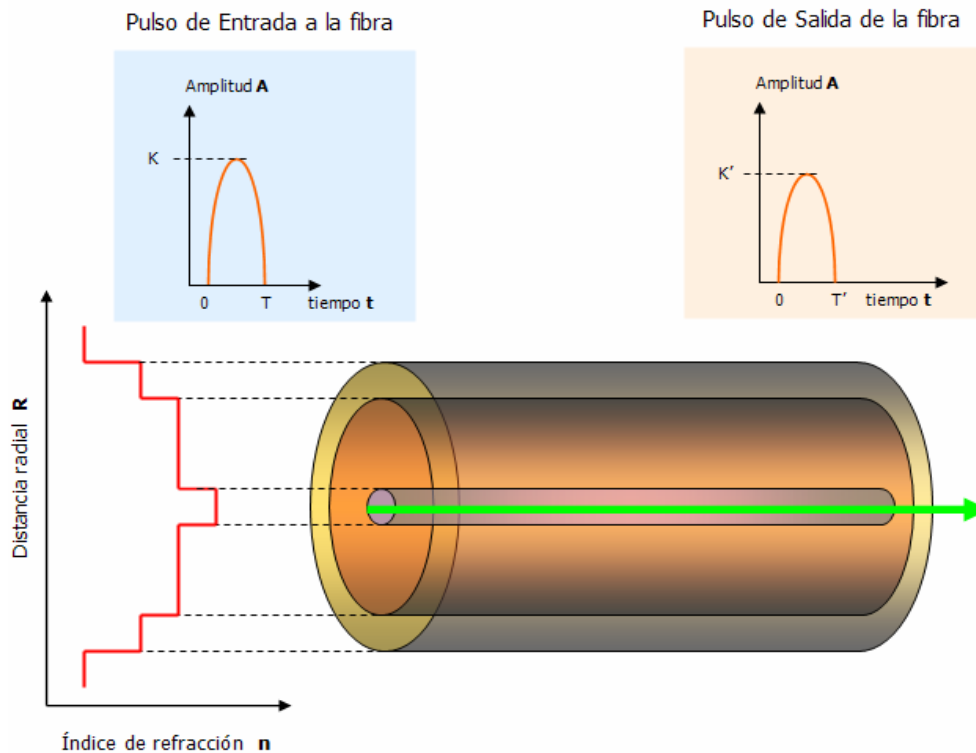


Figura 65: Fibra óptica monomodo

A su vez, las fibras ópticas monomodo, se clasifican en función de los materiales de fabricación en fibras SMF, DSF y NZDSF cuyas principales características se detallan a continuación [36]:

- **Fibra óptica monomodo estándar (SMF)**

Las fibras ópticas monomodo estándar o SMF (*standard single mode fiber*) posee unas características muy básicas. Así pues, posee una atenuación del orden de 0,2 dB/km y una dispersión cromática del orden de 16 pseg/km · nm en longitud de onda de 1550 nm. En longitud de onda de 1330 nm posee una dispersión cromática nula, pero la atenuación de la señal se duplica.

- **Fibra óptica monomodo de dispersión desplazada (DSF)**

Las fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada o DSF (*dispersion shifted fiber*) poseen unas características que mejoran la dispersión cromática respecto de las anteriores. Poseen una atenuación del orden de 0,25 dB/km (aumenta respecto a la fibra SMF) pero posee una dispersión cromática nula en longitud de onda de 1550 nm. Su principal inconveniente se debe a los efectos no lineales, como puede ser el fenómeno de mezclado de cuarta onda (FWM) que imposibilitan la utilización de esta fibra óptica en sistemas de multiplexación por longitud de onda (WDM). Esta fibra fue introducida en el mercado a mediados de los años 80 y permanece en uso, sin embargo nunca ha llegado a ser tan común como la fibra monomodo estándar.

- **Fibra óptica monomodo de dispersión desplazada no nula (NZDSF)**

Las fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada no nula o NZDSF (*non zero dispersion shifted fiber*) surgen para intentar resolver los inconvenientes de la fibra anterior. Posee un valor de dispersión cromática muy próximo a cero pero no nulo (de ahí su nombre) en longitud de onda de 1550 nm. Por el contrario, logran en gran medida contrarrestar los efectos de los fenómenos no lineales mediante la dispersión cromática.

El diseño de una fibra de dispersión desplazada se puede modificar para desplazar la dispersión cero a una longitud de onda más allá del rango de operación de los amplificadores dopados con erbio (EDFA), para evitar las mezclas de ondas que causan los problemas en los sistemas que utilizan multiplexación de longitudes de onda (WDM). Por ejemplo, un pequeño adelanto de la dispersión de guía de onda puede llevar la dispersión cero a una longitud de onda de 1600 nm.

En la figura 66 se muestra una gráfica donde se representan las diferentes curvas de dispersión cromática de estas tres fibras ópticas anteriores para distintas longitudes de onda [36].

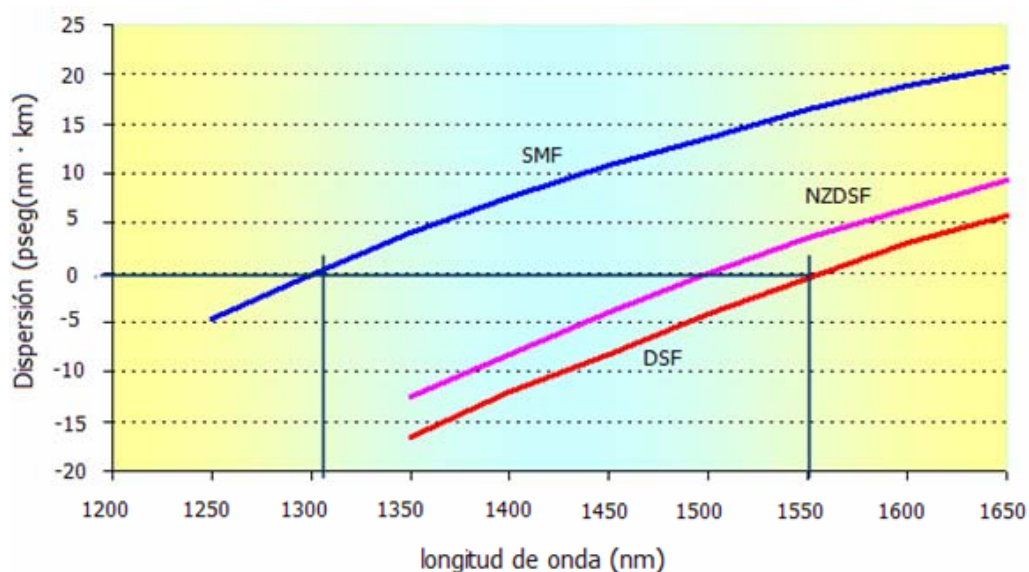


Figura 66: Dispersión cromática de las fibras monomodo SMF, DSF y NZDSF

Para concluir este apartado, se muestra en la figura 67 una comparativa entre los diferentes tipos de fibra óptica explicados anteriormente, que permite visualizar las diferencias más significativas entre cada una de ellas.

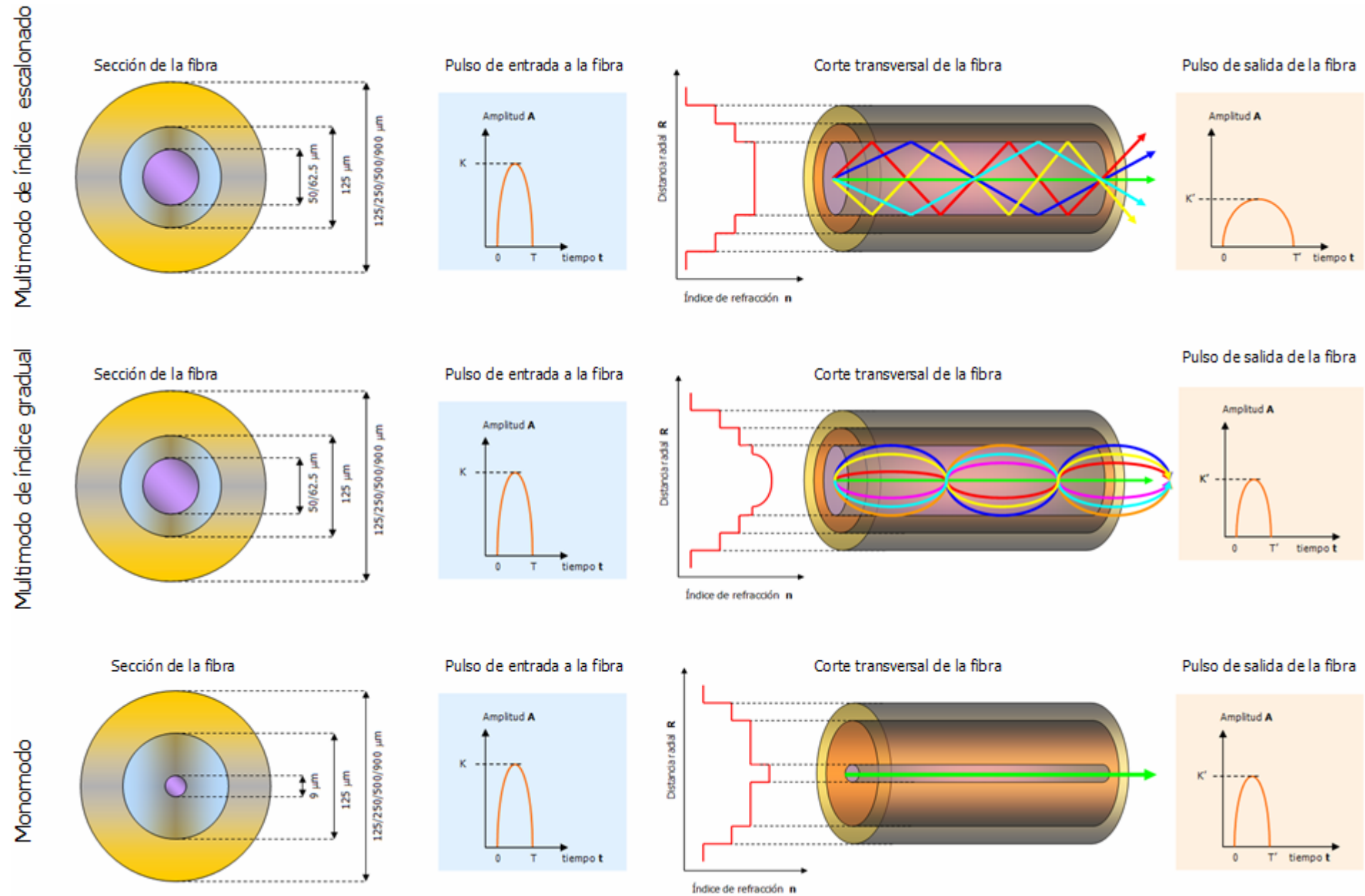


Figura 67: Comparativa entre los diferentes tipos de fibra óptica

3.3.4. Estándares de la fibra óptica

A lo largo de la evolución de la fibra óptica, se han ido especificando diferentes estándares internacionales que clasifican, definen y particularizan los distintos tipos de fibra óptica del mercado.

Para lograr rendimientos ópticos de acuerdo con cada aplicación, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) definió diversas normas que establecían los rendimientos de las fibras ópticas tanto monomodo como multimodo. Estas normas son todas las englobadas en el grupo ITU-T G.65x, así como las englobadas por la clasificación de la EIA. Todas ellas desarrollan a lo largo del *Apéndice I: Estándares de la fibra óptica* del presente proyecto.

3.4. Parámetros de las fibras ópticas

Una vez conocida la estructura y composición de una fibra óptica, es necesario conocer los parámetros que caracterizan a las fibras. Así pues estos parámetros ayudarán a conocer cuáles son las características más importantes de estos cables así como sus virtudes y limitaciones.

Existen dos grupos de parámetros en los cuales se engloban todos y cada uno de ellos, y son los parámetros estructurales y los parámetros de transmisión. Todos ellos establecen las condiciones en las que se puede realizar la transmisión de información.

3.4.1. Parámetros estructurales

Los parámetros estructurales son todos aquellos relacionados con la geometría y estructura propia de cada fibra óptica. Estos parámetros determinan y caracterizan los tipos de fibras ópticas existentes en el mercado, de tal forma que la clasificación de las fibras depende directamente de ellos. Existen muchos y muy variados tipos de parámetros que caracterizan las fibras aunque los más importantes son [30] [36]:

- Perfil de índice de refracción, cuya variación permite obtener fibras con diferentes dispersiones.
- Dimensiones del núcleo y del revestimiento, que determinan el tipo de propagación: monomodo o multimodo.
- Diámetro del campo modal, que indica cómo se produce la distribución geométrica de la luz en el modo propagado
- Apertura numérica, que indica el número de rayos capaces de entrar en el núcleo de transmisión de una fibra óptica.

- Longitud de onda de corte, que determina que la fibra óptica transmita en un solo modo de propagación únicamente.

El desarrollo y clasificación de forma minuciosa de los diferentes parámetros estructurales se encuentra disponible en el *Apéndice II: Parámetros de las fibras ópticas, apartado AP.1. Parámetros estructurales*.

3.4.2. Parámetros de transmisión

Los parámetros de transmisión son todos aquellos relaciones con la transmisión de señales a través de fibra óptica. Existen también muchos tipos de parámetros que caracterizan las fibras y en función de su naturaleza y efectos sobre la fibra se clasifican en dos grandes grupos: parámetros de atenuación y parámetros de dispersión. A continuación se muestra una tabla resumen con la clasificación de los parámetros de transmisión [30] [35] [36]:

Parámetros de transmisión	Atenuación	Pérdidas extrínsecas	Por curvatura Por conexión y empalme Otras
		Pérdidas intrínsecas	Pérdidas inherentes / fabricación Pérdidas UV e IR Reflexión de Fresnel Scattering de Rayleigh
	Dispersión	Dispersión Modal	
		Dispersión Polarización de Modo PMD	
		Dispersión cromática	Dispersión material Dispersión guía de onda

Figura 68: Clasificación de los parámetros de transmisión

3.4.2.1. Atenuación

La luz que viaja a través de una fibra óptica pierde potencia a medida que avanza a lo largo de ella, y por tanto, con la distancia. Las pérdidas por atenuación limitan la distancia de transmisión y dependen de la longitud de onda de la luz y del material por el que se propaga.

Se define la atenuación en el interior de la fibra como la relación entre las potencias luminosa de salida y entrada a la misma, expresada en decibelios y calculada para una longitud de onda determinada, según la expresión [30]:

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_T}{P_R} \quad (67)$$

Si bien, la magnitud que realmente caracteriza a las fibras es el coeficiente de atenuación, que se define como la atenuación por unidad de longitud (generalmente en kilómetros) para una determinada longitud de onda, según la expresión [36]:

$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \cdot \log \frac{P_T}{P_R} \quad (68)$$

Las pérdidas más bajas se encuentran a una longitud de onda de 1550 nm, valor que se utiliza fuertemente para transmisiones de larga distancia, mientras que los valores más altos se encuentran en longitudes de onda menores.

La atenuación de la señal en la fibra no depende del ancho de banda de modulación, debido a que la frecuencia portadora es superior en varios órdenes de magnitud a la frecuencia de modulación lo que no ocurre en otras guías de onda convencionales.

La atenuación de la luz en una fibra óptica se produce como consecuencia de varios efectos y se pueden clasificar en pérdidas extrínsecas y pérdidas intrínsecas.

▪ *Pérdidas extrínsecas*

Este tipo de pérdidas se deben a factores extrínsecos a la naturaleza de las fibras, como lo son los parámetros de curvatura, los empalmes entre fibras ópticas o los parámetros externos, debidos a la instalación o temperatura a la que se ve sometida la fibra. A consecuencia de estos se producen atenuaciones en la luz que se transmite a lo largo de la fibra, por lo que principalmente producen una pérdida de potencia de la señal a lo largo de la transmisión, disminuyendo el valor de la amplitud de dicha señal [35]. La clasificación y el desarrollo de las diferentes pérdidas extrínsecas más comunes de la fibra óptica se encuentran detallados en el apéndice II del presente documento.

▪ *Pérdidas intrínsecas*

Este tipo de pérdidas se deben a factores intrínsecos a la naturaleza de las fibras, y por tanto propios de la fabricación y funcionamiento operacional de las mismas. Como también ocurre con las pérdidas extrínsecas, estas pérdidas originan disminuciones de potencia en la señal transmitida, disminuyendo la amplitud de dicha señal. Así por ejemplo, las pérdidas intrínsecas más importantes son [36]:

- Pérdidas inherentes a la fibra durante el proceso de fabricación de la misma.
- Absorción por rayos UV e IR, que originan las denominadas ventanas de operación de la fibra óptica o bandas de longitudes de onda óptimas para la transmisión de luz.
- Reflexión de Fresnel, originada por el salto o variación del índice de refracción en el interfaz de unión entre fibra.

- Scattering de Rayleigh, se produce cuando la luz colisiona en su camino con partículas extrañas al medio continuo por el que se propaga.

El desarrollo de forma minuciosa de las pérdidas intrínsecas arriba indicadas se encuentra disponible en el apéndice II del presente documento.

▪ *Atenuación total*

Si se suman todas las pérdidas detalladas en los apartados anteriores, es decir, la atenuación producida por pérdidas intrínsecas y extrínsecas, se obtiene una función matemática que dibuja una curva donde se pone de manifiesto la existencia de tres zonas o ventanas operativas, que justifican su utilización dado el bajo nivel de atenuación que soportan. A continuación se muestra una gráfica de la atenuación de una fibra, donde aparecen las principales fuentes de atenuación [36]:

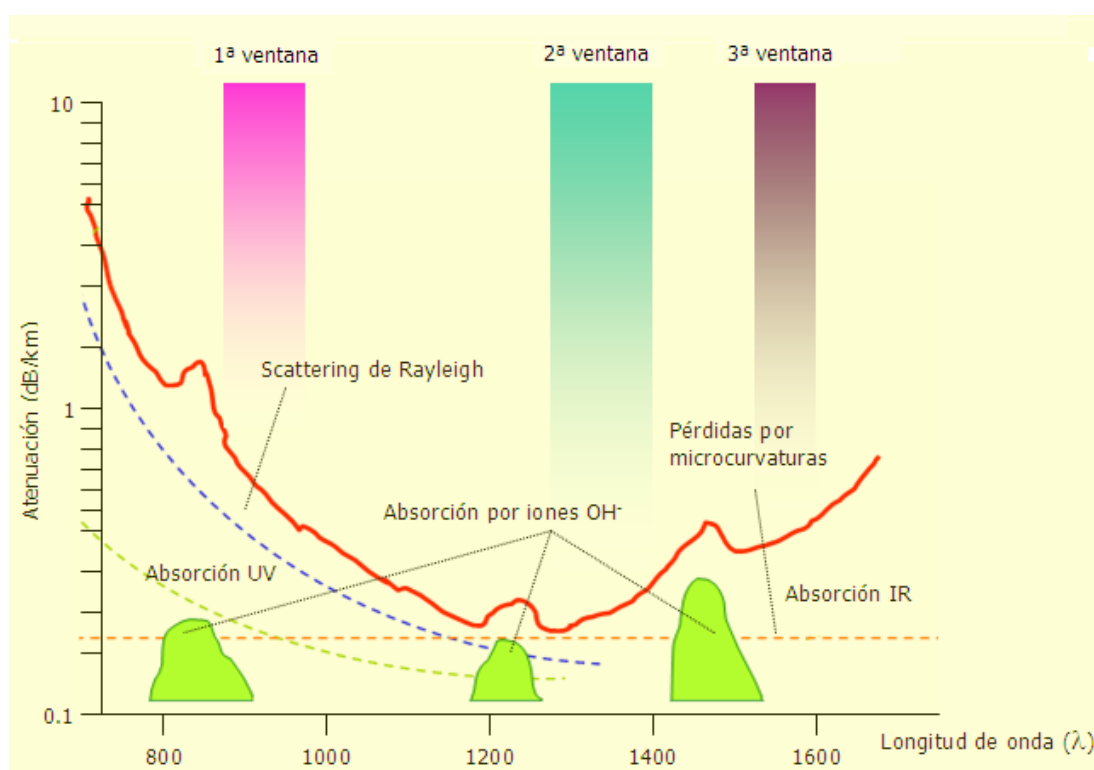


Figura 69: Gráfica de atenuación total en una fibra óptica en función de la longitud de onda

En la figura 69, se observan diversas zonas:

- Una zona por debajo de los 800 nm, que no es conveniente utilizar por ser de alta atenuación.
- Una zona por encima de los 1600 nm que presenta problemas de atenuación por el efecto de la radiación infrarroja. Además, la tecnología de emisores y fotodetectores para esta longitud de onda es muy reciente.

- Tres zonas de mínima atenuación, donde se ajustan las ventanas operativas de trabajo, y por tanto que determinan las longitudes de onda habituales para trabajar. Tal y como ya se comenta en el apéndice II, apartado AP.2.2.1.2 Pérdidas extrínsecas.

3.4.2.2. Dispersión

La dispersión se traduce en pérdidas en el ancho de banda de la señal, así como en pérdidas por distancia recorrida (como en el caso de la atenuación). El ancho de banda de una fibra óptica es una medida de su capacidad de transmisión de información, limitado por la dispersión total de la fibra o ensanchamiento del pulso transmitido. Este hecho limita la capacidad de transmisión de información dado que los pulsos se distorsionan y ensanchan a lo largo de la transmisión, solapándose unos con otros y convirtiéndose en indistinguibles para el equipo receptor [30].

La dispersión limita tanto la distancia de transmisión como el ancho de banda de la misma y es una función de la longitud de la fibra óptica, dado que cuanto mayor sea la longitud de la fibra, más pronunciado será el efecto. Este tipo de dispersión en el ancho de banda se puede subdividir en tres categorías [35] [36]:

- **Dispersión modal**, originada por los diferentes caminos o modos que sigue un haz de la luz de fibra, dando como resultado que los diferentes rayos de luz recorran distancias diferentes y lleguen al otro extremo de la fibra en instantes de tiempos distintos.
- **Dispersión por polarización del modo**, producida por una circularidad imperfecta del núcleo de la fibra, lo que da lugar a que existan efectos de dispersión no deseados en la fibra
- **Dispersión cromática**, que surgen como consecuencia de la dispersión del material y la dispersión de guía de onda (propios del material y de la geometría de la fibra).

El desarrollo de los tres tipos de dispersión más comunes presentes en la transmisión por fibra óptica arriba indicados, se encuentra disponible en el apéndice II del presente documento.

3.4.2.3. Otros parámetros: no linealidades de la fibra óptica

El hecho de asumir que los sistemas de comunicaciones ópticas se comportan linealmente es una aproximación adecuada cuando se opera a unos niveles de potencia moderados (magnitudes del orden de mW) y a velocidades de transmisión que no superen los 2.5 Gbps. Sin embargo a velocidades mayores (en torno a 10 Gbps) o potencias superiores comienzan a ser importantes ciertos efectos producidos por las no linealidades, y en el caso de sistemas WDM estos efectos son muy importantes incluso

con potencias y velocidades de transmisión moderadas, condicionando el número de canales del sistema y la separación entre ellas.

Las no linealidades de la fibra se pueden clasificar en dos categorías [36]:

- Las que se producen como consecuencia de la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado, conocido como efecto Kerr, que a su vez es proporcional al cuadrado de la amplitud: modulación de autofase (SPM), modulación de fase cruzada (CPM) y la mezcla de cuarta onda (FWM).
- Las que se producen por efectos de difracción en la fibra, debido a la interacción de las ondas de luz con los fotones (vibraciones moleculares) en el silicio del núcleo: dispersión de Raman (SRS) y dispersión de Brillouin (SBS).

Los principales efectos de no linealidad de la fibra citados en los párrafos anteriores, se encuentran clasificados, desarrollados y caracterizados matemáticamente en el apéndice II del presente documento.

3.5. Dispositivos emisores y receptores de la luz

Los dispositivos emisores y receptores de luz, son aquellos elementos de la red óptica que forman parte de la red activa, y por tanto, que necesitan alimentación para su puesta en marcha y funcionamiento. A diferencia de todos los elementos que se han detallado en los apartados anteriores (pasivos), estos dispositivos se encargan de la transformación de señales ópticas a eléctricas y viceversa, condición necesaria para la transmisión de luz a través de la fibra.

A lo largo de los siguientes apartados se detallarán los aspectos más relevantes de los dispositivos transmisores y receptores de luz intervinientes en las redes de fibra óptica.

3.5.1. Transmisores ópticos

Se denomina transmisor óptico al sistema cuya función consiste en convertir una señal eléctrica de entrada (información) en una señal óptica correspondiente, conduciéndola hacia el canal de comunicación, en este caso, la fibra óptica [37].

Existen dos tipos de emisores de luz para comunicaciones ópticas:

- Emisores de luz no coherente: los diodos de luz (LED).
- Emisores de luz coherente: los láseres (concretamente, semiconductores).

La eficiencia en el acoplamiento de luz generada por la fuente dentro de la fibra depende del tipo de emisor y fibra empleados. El acoplamiento puede ser muy ineficiente cuando se utilizan simultáneamente un LED y una fibra monomodo ($< 1\%$), a diferencia del acoplamiento con un láser, en donde la eficiencia es mucho mayor (entre 30-50%) [36].

Cualquier modelo de transmisor óptico (con modulador externo), consta de una serie de componentes fijos, siendo estos: la interfaz eléctrica, la interfaz óptica, la fuente de luz, el modulador externo y el atenuador (en sistema de corta distancia). A continuación se muestra una figura con la relación entre componentes del modelo de transmisor óptico [37].

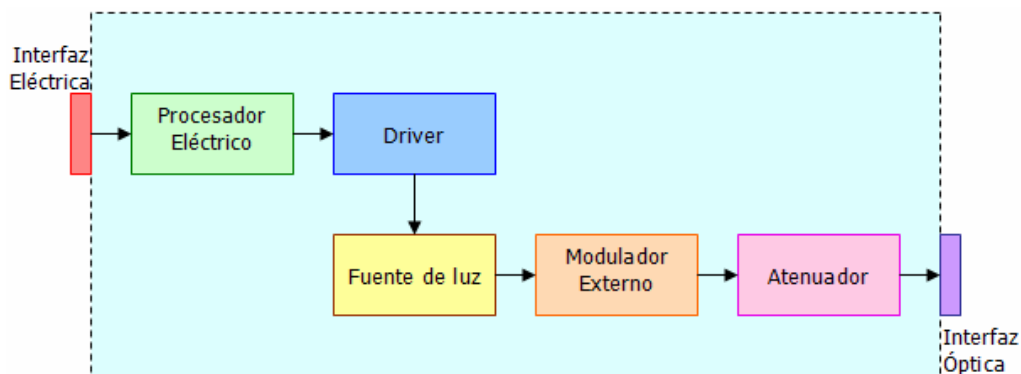


Figura 70: Diagrama de bloques de un transmisor óptico

La interfaz eléctrica está referida a los cables, conectores electrónicos estandarizados o pines que emergen del paquete. Algunos conectores se accionan directamente por la entrada de señales eléctricas. Los transmisores complejos requieren potencia para su funcionamiento y aceptan múltiples entradas eléctricas.

La interfaz óptica entre el transmisor y la fibra puede tener varias formas. Una de ellas consiste en integrar un conector de fibra en el transmisor y otra consiste en utilizar un latiguillo de conexión que se empalma o conecta a la fibra. La elección de uno u otro depende de los factores que se incluyan, entre los que destacan: coste, tiempo de uso del sistema (permanente o temporal), tipo de fibra, ambiente de operación y la importancia de las pérdidas de interconexión [35].

El procesador eléctrico acondiciona la señal eléctrica en una forma apropiada para la fuente de luz. En general, consiste en un circuito que convierte variaciones de tensión en variaciones de corriente, la cuál modula la fuente óptica.

El *driver* consiste en un circuito conductor que acondiciona totalmente la señal que se suministra a la fuente y depende de los requerimientos de la aplicación, el formato de datos y la fuente de luz. Así por ejemplo, los láseres semiconductores necesitan niveles de corriente cercanos al umbral del láser; estos niveles los suministra el *driver*. También por ejemplo, el *driver* es capaz de disminuir el tiempo de subida de un LED de bajo coste y permitir su utilización en sistemas que requieren gran ancho de banda.

3.5.1.1. Tipos de transmisores

Tal y como ya se ha comentado anteriormente, existen dos tipos de emisores de luz: los emisores de luz coherente y los emisores de luz no coherentes, cuyas características principales se detallan a continuación.

- ***Emisores de luz no coherente: Diodos LED***

Los emisores de luz no coherente corresponden a los diodos de luz LED, también conocido como LED (acrónimo del inglés de *Light-Emitting Diode*). Es un dispositivo semiconductor (diodo) que emite luz no coherente de espectro reducido cuando se polariza de forma directa la unión PN del mismo y circula por él una corriente eléctrica. Este fenómeno es una forma de electroluminiscencia. El color de la luz (y por tanto la longitud de onda), depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo y puede variar desde el ultravioleta, pasando por el visible, hasta el infrarrojo [37].

El funcionamiento físico consiste en que, en los materiales semiconductores, un electrón al pasar de la banda de conducción a la de valencia, pierde energía; esta energía perdida se puede manifestar en forma de un fotón desprendido, con una amplitud, una dirección y una fase aleatoria.

El que esa energía perdida cuando pasa un electrón de la banda de conducción a la de valencia se manifieste como un fotón desprendido o como otra forma de energía (calor por ejemplo) va a depender principalmente del tipo de material semiconductor. Cuando un diodo semiconductor se polariza directamente, los huecos de la zona p se mueven hacia la zona n y los electrones de la zona n hacia la zona p; ambos desplazamientos de cargas constituyen la corriente que circula por el diodo. Si los electrones y huecos están en la misma región, pueden recombinarse, es decir, los electrones pueden pasar a "ocupar" los huecos, "cayendo" desde un nivel energético superior a otro inferior más estable [37].

Todo este proceso emite con frecuencia un fotón en semiconductores de banda prohibida directa o "*direct bandgap*" con la energía correspondiente a su banda. Esto no quiere decir que en los demás semiconductores (semiconductores de banda prohibida indirecta o "*indirect bandgap*") no se produzcan emisiones en forma de fotones; sin embargo, estas emisiones son mucho más probables en los semiconductores de banda prohibida directa (como el Nitruro de Galio) que en los semiconductores de banda prohibida indirecta (como el Silicio) [37].

La emisión espontánea, por tanto, no se produce de forma notable en todos los diodos y sólo es visible en diodos como los LEDs de luz visible, que tienen una disposición constructiva especial con el propósito de evitar que la radiación sea reabsorbida por el material circundante, y una energía de la banda prohibida coincidente con la correspondiente al espectro visible. En otros diodos, la energía se libera principalmente en forma de calor, radiación infrarroja o radiación ultravioleta. En el caso de que el diodo libere la energía en forma de radiación ultravioleta, se puede conseguir aprovechar esta radiación para producir radiación visible, mediante sustancias

fluorescentes o fosforescentes que absorban la radiación ultravioleta emitida por el diodo y posteriormente emitan luz visible.

El dispositivo semiconductor está comúnmente encapsulado en una cubierta de plástico de mayor resistencia que las de vidrio que usualmente se emplean en las lámparas incandescentes. Aunque el plástico puede estar coloreado, es sólo por razones estéticas, ya que ello no influye en el color de la luz emitida. Usualmente un LED es una fuente de luz compuesta con diferentes partes, razón por la cual el patrón de intensidad de la luz emitida puede ser bastante complejo.

Para obtener una buena intensidad luminosa debe escogerse bien la corriente que atraviesa el LED; para ello, hay que tener en cuenta que el voltaje de operación va desde 1.8 V hasta 3.8 V aproximadamente (lo que está relacionado con el material de fabricación y el color de la luz que emite) y la gama de intensidades que debe circular por él varía según su aplicación. Valores típicos de corriente directa de polarización de un LED corriente están comprendidos entre los 10 y los 40 mA. En general, los LEDs suelen tener mejor eficiencia cuanto menor es la corriente que circula por ellos, con lo cual, en su operación de forma optimizada, se suele buscar un compromiso entre la intensidad luminosa que producen (mayor cuanto más grande es la intensidad que circula por ellos) y la eficiencia (mayor cuanto menor es la intensidad que circula por ellos) [37].

Tanto los métodos de prefusión como de descarga estable son importantes para conseguir bajas pérdidas en los empalmes. Sin embargo, también resulta crucial un buen alineamiento previo de las fibras. Las distintas técnicas de alineamiento pueden clasificarse en fijas y móviles.

La descripción sobre la tecnología LED y la clasificación de los tipos de diodos existentes en el mercado se encuentran detalladas en el apéndice III del presente documento.

▪ ***Emisores de luz coherente: láser***

Los emisores de luz no coherente corresponden a los láseres. El término láser es el acrónimo del inglés *amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Un láser toma la forma de un diodo de inyección pn polarizado en directo, en el cual se ha incorporado además de la unión pn, un par de superficies reflectantes que encierran a la unión que permiten el confinamiento óptico de la radiación que se genera por recombinación entre las vecindades de la unión [35].

La emisión de radiación láser se caracteriza por estar compuesta de paquetes de ondas electromagnéticas que poseen todos la misma longitud de onda (monocromaticidad), la misma frecuencia de vibración y están en fase unos con respecto a otros (coherencia).

Una fuente de radiación láser emite un haz de rayos luminosos que se propaga en una única dirección del espacio. La alta energía asociada al haz se puede concentrar, por

tanto, en una pequeña zona del espacio. La densidad de energía en dicha zona puede ser tan grande, que un solo haz láser de la apropiada longitud de onda puede ser utilizado, por ejemplo, para realizar finos cortes en una plancha de acero [37].

Debido a las ventajas que presenta este tipo de diodo, tales como elevada potencia de salida (del orden de 10 mW), gran ancho de banda, posibilidad de modulación directa en altas frecuencias (superior a 24 GHz), ancho espectral angosto y alta eficiencia de acoplamiento con la fibra (entre un 30-50%), el láser es la fuente de luz más destacada en sistemas de transmisión por fibra óptica, sobre todo en los de alta capacidad con grandes longitudes espaciales [37].

• Estructura y funcionamiento de un láser

El funcionamiento de un láser depende de los elementos básicos y componentes que lo constituyen. Un láser genérico consta de los siguientes elementos funcionales [37]:

- **El sistema de bombeo.** Este sistema es el encargado de suministrar la energía al material que va a producir la emisión estimulada, siendo los más comunes el bombeo óptico y el bombeo por descarga eléctrica.
- **El medio activo.** Este medio es aquel en el que se producirá la emisión estimulada de radiación.
- **La cavidad óptica.** Esta cavidad es el recinto donde se amplificará la radiación de emisión.

Existen cuatro procesos básicos (sistemas de bombeo) que se producen en la generación del láser dentro del medio activo, y son los denominados bombeo, emisión espontánea de radiación, emisión estimulada de radiación y absorción.

Tanto los mecanismos de generación del láser, como la caracterización y clasificación de los mismos, se encuentran detallados en el apéndice III del presente documento.

3.5.2. Receptores ópticos

Los receptores ópticos transforman las señales ópticas en señales eléctricas, en concreto, es el fotodetector el encargado de esta transformación, recobrando la información enviada por el transmisor a través del canal de fibra óptica.

En el siguiente esquema se muestra un diagrama de bloques genérico de un receptor óptico para un sistema digital con detección directa, donde el componente clave es el detector de luz.

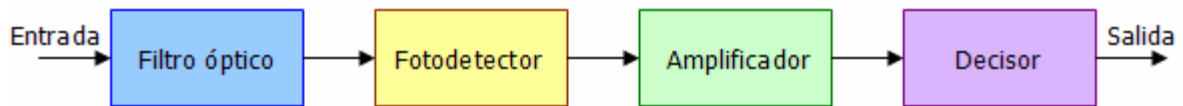


Figura 71: Diagrama de bloques de un receptor óptico

El receptor óptico, por tanto, consta de los siguientes elementos [36]:

- Un filtro óptico, encargado de eliminar el ruido y de seleccionar el canal adecuado de recepción.
- Un fotodetector, elemento encargado de generar una corriente eléctrica proporcional a partir de una potencia óptica procedente del filtro.
- Un amplificador, generalmente de tipo *front-end*, que amplifica la señal eléctrica para poder ser procesada correctamente m
- Un decisor, que decide de forma binaria cuando se está recibiendo un 1 o un 0 en función de la información transmitida por el canal.

Algunos receptores son precedidos de un preamplificador óptico al final de la fibra para mejorar el rendimiento del procesador. Existen receptores analógicos y receptores digitales, donde la diferencia radica en el tipo de señal a convertir al final del mismo.

Los fotodetectores más útiles son los basados en semiconductores, denominados fotodiodos. Estos fotodiodos se basan en el proceso de absorción estimulada de fotones, y son muy utilizados dado que con ellos es más sencillo llegar a tener fotodetecciones, puesto que poseen una sensibilidad muy elevada y una rápida respuesta. Introducen poco ruido en el circuito y poseen un bajo coste y una alta fiabilidad [36]. Los más comunes son dos:

- fotodiodos PIN, en los que la absorción de fotones se produce mayoritariamente en el interior de la región de deplexión.
- fotodiodos de avalancha, basados en la ionización por impacto.

Los fundamentos generales de funcionamiento de un fotodiodo a nivel eléctrico, su caracterización matemática, y la clasificación y desarrollo de los diferentes tipos se encuentran disponibles a lo largo del apéndice III del presente documento.

3.6. Elementos de transmisión en sistemas de fibra óptica

Un sistema de comunicaciones ópticas está constituido por varios elementos esenciales necesarios para la transmisión de información. En general, se puede destacar que un sistema de fibra óptica está constituido por un transmisor, cuya misión es

convertir la señal eléctrica en señal óptica susceptible de ser enviada a través de una fibra óptica. En el extremo opuesto de la fibra óptica se encuentra el receptor, cuya misión es la de convertir la señal óptica recibida en señal eléctrica nuevamente.

El transmisor puede emplear como emisor un diodo LED o un diodo de inyección láser ILD, donde la cantidad de luz emitida es proporcional a la corriente de excitación, por lo tanto el conversor voltaje a corriente convierte el voltaje de la señal de entrada en una corriente que se utiliza para dirigir la fuente de luz. A este elemento se le denomina convertidor electro-óptico (E/O).

En el otro extremo, el receptor consiste en un diodo PIN o un APD (fotodiodo de avalancha) acoplado a la fibra óptica, que convierten la energía de luz en corriente. En consecuencia, se requiere un conversor corriente a voltaje que transforme los cambios en la corriente del detector a cambios de voltaje en la señal de salida que se acopla a la fibra óptica. Este elemento recibe el nombre de convertidor opto-eléctrico (O/E).

En sistemas de comunicaciones de fibra óptica se utiliza una modulación de amplitud, modulando la intensidad de luz generada por el emisor. Las no linealidades de los emisores y receptores derivadas de la conversión de señales eléctricas a ópticas y viceversa, así como de las fuentes de ruido que se superponen a la señal en los sistemas típicos de fibra óptica, hacen que este sistema sea especialmente apropiado para la transmisión de señales digitales [30].

Las señales digitales representadas a través de código binario se corresponden a los estados de encendido y apagado del emisor. No obstante, también es posible transmitir señales analógicas, aunque no es algo habitual dado que de esta forma no se optimiza la calidad de transmisión.

Otros tipos de modulación, tales como modulación en frecuencia y demás sistemas coherentes están en fase de desarrollo, debido a la dificultad de obtener señales luminosas espectralmente puras y que simultáneamente puedan ser moduladas en frecuencia.

La señal óptica que se propaga a través de la fibra óptica se degrada por la atenuación, dispersión –restricción del ancho de banda de la fibra- y efectos no lineales de la fibra, por lo que es preciso regenerar la señal transmitida. Para poder amplificar la señal óptica es necesario tratar la señal en forma eléctrica, por lo que los convertidores E/O y O/E son componentes indispensables en un repetidor óptico. El amplificador e igualador de la señal eléctrica son similares a los de los sistemas de transmisión convencionales.

Toda la infraestructura de transmisión sobre fibra óptica está basada en gran variedad de elementos que se engloban dentro de la tecnología de transmisión que se ha concretado anteriormente. A continuación se detallan los elementos más importantes que intervienen en el proceso de transmisión sobre fibra óptica.

3.6.1. Cables ópticos

Las fibras ópticas no suelen encontrarse como elementos independientes, sino que suelen reorganizarse en estructuras constituidas por varias fibras ópticas, bajo una misma tipología física y denominadas cables ópticos.

El cable es la estructura que protege a las fibras ópticas de la degradación medioambiental, de daños mecánicos, facilita la manipulación de las fibras y las aísla de las tensiones mecánicas que puedan ocurrir durante el proceso de instalación

Existe una multitud de tipos de cables ya que estos se diseñan en función del entorno en el que van a ser empleados, desde cables para oficinas, cables para equipos de testeo, cables submarinos, etc. El diseño de un cable se basa además del entorno en tres características de la fibra óptica [38]:

- **La sensibilidad a la curvatura.** Al curvarse la fibra óptica se produce una atenuación adicional, pues ciertos modos de transmisión se escapan del núcleo. Las pérdidas varían exponencialmente con la curvatura y no son apreciables hasta superar un ángulo crítico. Como regla práctica el radio de curvatura de la fibra óptica mínimo debe ser 10 veces el diámetro de la protección secundaria de la fibra.
- **La resistencia mecánica.** Este tipo de resistencia de la fibra óptica es menor que las tensiones a las que puede verse sometido en su instalación, por lo que los cables deben incorporar elementos adicionales que les proporcionen la suficiente resistencia.
- **La fatiga estática y el envejecimiento.** Los cables deben incluir elementos hidrófugos que protejan a la fibra óptica de la humedad que puede provocar el aumento del tamaño de las fisuras producidas por la tracción a la que se somete.

3.6.1.1. Composición y estructura de los cables ópticos

Teniendo en cuenta lo anterior, los cables de fibra óptica se fabrican con varios materiales para adecuarse al entorno de la instalación. Así pues, los cables exteriores deben ser fuertes, a prueba de intemperie, resistentes a la radiación ultravioleta (UV) y a las variaciones máximas de temperatura que se pueden presentar durante el proceso de instalación y a lo largo de su vida. Por otro lado, los cables interiores deben ser fuertes a la par de flexibles, con el grado requerido de resistencia al fuego o de emisión de humos. Los componentes más comunes son: polietileno, cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano, hidrocarburos y polifluorados, vinilacetato de etileno, cabos de aramida, etc., además de otros materiales para la coraza de acero, el hilo rasgado, el miembro central y el relleno intersticial [39]. Estos componentes se detallan en el apéndice IV del presente documento, concretamente en el apartado AP.3.1.3.

Un cable óptico está constituido por una serie de elementos genéricos presentes en cualquier tipo de cable, independientemente de la estructura y composición del mismo.

Se puede presentar al cable óptico como una estructura constituida por 6 capas concéntricas, siendo estas [39]:

- **Fibra óptica.** Esta capa está constituida por las fibras ópticas encargadas de la transmisión de información, y cuya composición se detalla en el apartado 3.6.1. *Composición y geometría de una fibra óptica.* (1)
- **Protección secundaria,** que consiste en una protección mecánica que suele ser holgada o densa, de relleno intersticial. (2)
- **Elemento de tracción,** generalmente de aramida, Kevlar® o fibra de vidrio. (3)
- **Cubierta interna** protectora, de PE, PVC o poliuretano. (4)
- **Coraza** protectora, generalmente de acero. (5)
- **Cubierta exterior** protectora, de PE, PVC, poliuretano o fluoropolímeros. (6)

En figura 72 se muestran los elementos más importantes de un cable de fibra óptica descritos anteriormente y codificados con numerología del 1 al 6 [40]:

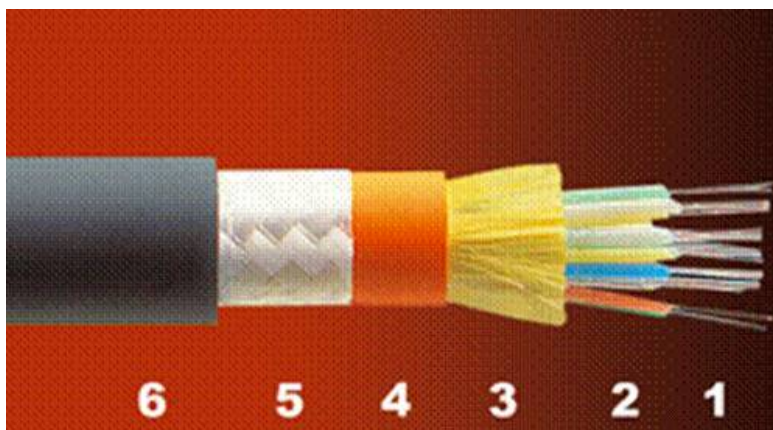


Figura 72: Estructura genérica de un cable óptico

En base a la configuración genérica anterior y sus respectivas capas concéntricas, existen varias estructuras básicas de cables de fibras ópticas. Los más comunes son los cables de estructura holgada y los cables de estructura densa o ajustada, aunque existen otras estructuras menos significativas tales como los cables blindados, aéreos autosoportantes, submarinos, OPGW, híbridos, en abanico, etc. Todos ellos se detallan a lo largo del apéndice IV del presente documento.

3.6.1.2. Estándares de los cables ópticos

Al igual que ocurriera con los estándares de la fibra óptica, los cables ópticos como parte integrante de la tecnología de transmisión óptica aparecen normalizados según los estándares internacionales de la ITU-T G.65x, ya comentados y especificados en el apartado 3.1.4 *Estándares de la fibra óptica* del presente documento.

Así pues, cabe destacar un estándar propio del cable óptico elaborado por la EIA que establece cierto código de reconocimiento y diferenciación de las fibras o tubos ópticos entre sí que conforman un cable óptico, tanto para cables de estructura holgada como estructura ajustada. El estándar registrado es el EIA/TIA-598-A, que establece un código de colores para cada cubierta de fibra óptica, homogeneizando en único criterio la identificación de la fibra.

A continuación se muestra el estándar EIA/TIA-598-A, también reconocido por IEC 60304 [41].









	COLOR	FIBRA
	Azul	1
	Naranja	2
	Verde	3
	Marrón	4
	Gris	5
	Blanco	6
	Rojo	7
	Negro	8
	Amarillo	9
	Violeta	10
	Rosa	11
	Turquesa	12

Figura 73: Colores del estándar EIA/TIA-598-A

En la tabla de la figura 73 aparecen la coloración para identificación para las fibras de la 1 a la 12. Sin embargo, no todas las fibras poseen esta configuración. Los cables ópticos pueden reorganizarse en grupos de fibra de 4, 6, 8, 12, 24, 48, 64, 144, etc... por lo que es necesario extrapolar la coloración anterior a las agrupaciones de fibra.

Así pues, para identificar cables constituidos de hasta 12 fibras ópticas, basta con las indicaciones de la tabla anterior. Pero en el caso de cables ópticos constituidos por más de 12 fibras, es necesario reagrupar las fibras en tubos de diferentes colores, cada uno de los cuales estará constituido por varias fibras. Por ejemplo, un cable de 64 fibras, está constituido por 8 tubos de 8 fibras cada uno. Un cable de 24 fibras, puede estar constituido por 4 tubos de 6 fibras cada uno. Un cable de 144 fibras, puede estar constituido por 12 tubos de 12 fibras cada uno, etc.

De esta forma, se extrapola la identificación de la tabla a todas las combinaciones de fibra posibles del mercado. A continuación se muestran las tablas de identificación de los cables ópticos de configuraciones típica: de 24, 48, 64 y 144 fibras [41].

Cable 24 FO		FIBRA													
TUBO															
		1	2	3	4	5	6								
		7	8	9	10	11	12								
		13	14	15	16	17	18								
		19	20	21	22	23	34								
Cable 48 FO		FIBRA													
TUBO															
		1	2	3	4	5	6	7	8						
		9	10	11	12	13	14	15	16						
		17	18	19	20	21	22	23	24						
		25	26	27	28	29	30	31	32						
		33	34	35	36	37	38	39	40						
		41	42	43	44	45	46	47	48						
Cable 64 FO		FIBRA													
TUBO															
		1	2	3	4	5	6	7	8						
		9	10	11	12	13	14	15	16						
		17	18	19	20	21	22	23	24						
		25	26	27	28	29	30	31	32						
		33	34	35	36	37	38	39	40						
		41	42	43	44	45	46	47	48						
		49	50	51	52	53	54	55	56						
		57	58	59	60	61	62	63	64						
Cable 144 FO		FIBRA													
TUBO															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
		37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48		
		49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60		
		61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72		
		73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84		
		85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96		
		97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108		
		109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120		
		121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132		
		133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144		

Figura 74: Colores del estándar EIA/TIA-598-A

No obstante, en España las instalaciones privadas no suelen seguir este estándar, que sí suelen adoptar la mayoría de las administraciones públicas. Existe paralelamente un estándar adoptado por los fabricantes españoles, y que se diferencia en alguna medida del estándar EIA/TIA-598-A. Así por ejemplo, la asignación de colores se ve modificada, siguiendo el siguiente patrón de colores diferentes. La protección primaria de la fibra sigue el siguiente esquema:


	COLOR	FIBRA
	Verde	1
	Rojo	2
	Azul	3
	Amarillo	4
	Gris	5
	Violeta	6
	Marrón	7
	Naranja	8
	Blanco	9
	Negro	10
	Rosa	11
	Turquesa	12

Figura 75: Colores del estándar adoptado por fabricantes españoles

En aquellos casos en los que las fibras no convivan en tubos independientes (es decir, fibras incluidas dentro de un mismo tubo), y existan más de 12 fibras por cable, los colores se repiten y se diferencian mediante números o bandas de color oscuro (tantas bandas como series existan).

Por otro lado, el color de los tubos holgados o ajustados no consiste en una repetición de los anteriores como ocurre en el caso del estándar EIA/TIA-598-A. En este caso el código de color adoptado por el estándar de fabricantes españoles es el siguiente:





	COLOR	TUBO
	Blanco	1
	Rojo	2
	Azul	3
	Verde	4

Figura 76: Colores del estándar EIA/TIA-598-A

Si el cable posee más de 4 tubos, entonces los colores se repiten y se diferencian mediante números o bandas de color oscuro (tantas como series existan).

3.6.2. Empalmes y conectores ópticos

En cualquier instalación de red óptica, se han de tener en cuenta las terminaciones de las fibras, dado que para poder dar el servicio adecuado, es necesario que se conecten a ciertos elementos de terminación que se encargan de finalizar la red.

Además, en muchas ocasiones no es viable realizar un diseño completo de una red sin tener que realizar divisiones o segregaciones en los cables de fibra óptica, uniones, empalmes, etc. dado que una de las tipologías más utilizadas en este campo es la red en estrella o árbol jerárquico, que tiene como consecuencia lo anterior.

Estos empalmes y conectores son muy influyentes en el funcionamiento del sistema, dado que son elementos anejos a la fibra que se incorporan a la misma, introduciendo generalmente ciertas pérdidas en la señal transportada. Es por tanto imprescindible reflejar las características y clasificación más importantes de ambos casos.

3.6.2.1. Empalmes ópticos

Un empalme óptico consiste en la técnica que se utiliza para unir permanentemente dos fibras ópticas entre sí mediante una conexión de bajas pérdidas. Para poder caracterizar al empalme con pérdidas muy bajas, es necesario que el núcleo de ambas fibras a unir esté correctamente alineado con las zonas activas del emisor y el receptor de luz.

Las pérdidas que se originan pueden ser principalmente de dos tipos: las causadas por factores externos, y que se relacionan con el método utilizado para la unión; y las debidas a factores intrínsecos y que se encuentran relacionados con las propiedades de la fibra [39].

Los factores intrínsecos a las fibras que ocasionan pérdidas, son irrecuperables dado que son inherentes a la composición física y estructura de la fibra óptica, y no pueden ser eliminados durante el proceso de conexión de fibras. A nivel de funcionamiento del sistema, estas pérdidas se consideran despreciables al ser comparativamente mucho menores que las pérdidas debidas a factores externos [38].

Los factores externos que pueden ocasionar las pérdidas más importantes en un empalme óptico son los siguientes [39]:

- Irregularidades en los extremos de las fibras, causados durante el proceso de corte, extracción y fabricación de la fibra.
- Núcleos desalineados de las fibras a unir, por desplazamiento de una de las fibras respecto a la otra, o por variación de la concentricidad.
- Cambio en el índice de refracción de las fibras, provocando esto la reflexión de señales por desplazamiento de los índices.
- Desplazamiento transversal de los extremos de la fibra, lo que supone una disminución de la sección útil del núcleo, y por tanto, una diferencia en el canal físico de transmisión de luz.
- Separación longitudinal de los extremos a unir, provocando una variación en el índice de refracción del medio para la luz incidente en el núcleo.
- Desplazamiento angular de los ejes de las fibras enfrentadas, modificando el ángulo de incidencia del haz de luz en la segunda sección de la fibra, lo que se traduce en energía lumínica perdida.

A continuación se representan gráficamente en la figura 77 algunos de los factores externos descritos anteriormente.

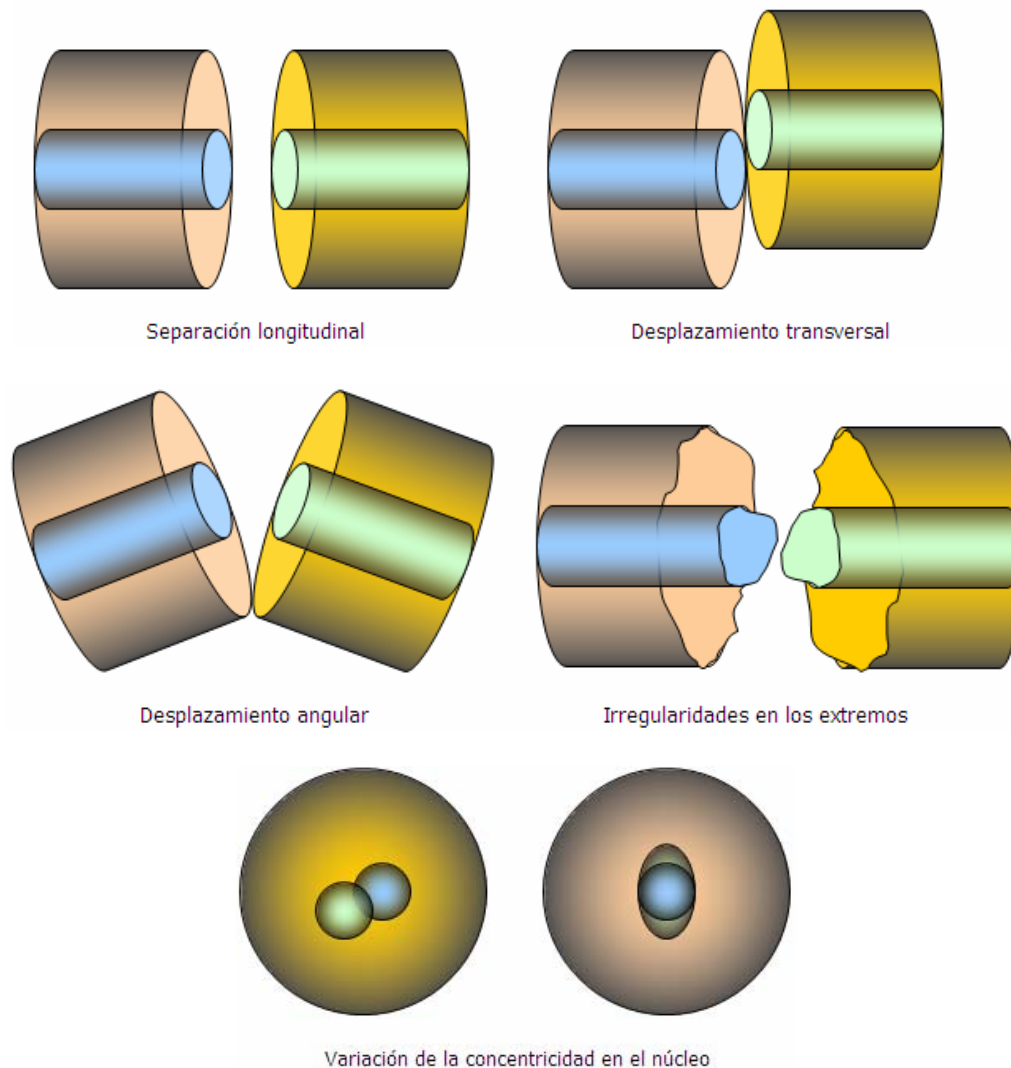


Figura 77: Factores externos producidos en las uniones de fibra óptica

Observando los casos anteriores, se extrae en conclusión que es muy necesario tener cierta diligencia a la hora de realizar uniones entre fibras ópticas, dado que pequeñas irregularidades puede dar lugar a importantes pérdidas en la transmisión.

Es por ello, que existen diversas técnicas de empalmes de fibra óptica, que intentan optimizar la unión física entre fibras, intentando reducir al mínimo los efectos descritos anteriormente. Las técnicas de empalmes ópticos más importantes son las siguientes [39]:

- Empalme por fusión, en el que se sueldan eléctricamente las dos fibras a unir.
- Empalme mecánico, en el que se utiliza un conector para unir ambas fibras.

- Empalme con métodos adhesivos, en el que se conexionan las fibras a través de pegamentos rápidos.

En el apéndice IV del presente documento se desarrolla una descripción completamente detallada sobre los diferentes tipos de empalmes y las distintas metodologías empleadas en cada uno de ellos.

▪ *Protección del empalme*

Generalmente la cubierta de las fibras se elimina previamente a la realización del empalme. Durante el proceso consistente en eliminar las cubiertas, cortar las fibras y situarlas en la máquina empalmadora, e incluso en el proceso de calentamiento, se producen grietas en las fibras que debilitan su resistencia. La resistencia de las fibras tras realizar un empalme se reduce en un 10% aproximadamente, por lo que se hace necesaria la posterior protección de la zona tratada.

A la hora de seleccionar un método de protección se deben considerar factores tales como: fiabilidad (variación de las pérdidas de empalme y rotura), facilidad de manejo y coste. Cuando el método de protección o su diseño no es bueno, las pérdidas del empalme sufren gran variación con la temperatura. Si por el contrario se realiza de forma adecuada, las pérdidas varían tan sólo 0,02 dB para rangos de temperatura desde -30 °C hasta +60 °C [38].

De entre los distintos métodos de protección utilizados destacan: una ranura con forma de V (*V-groove*) de plástico con cubierta, un par de láminas de cristal cerámico, un tubo que se contrae con el calor junto con una varilla de hacer o un molde de plástico. Finalmente, para la sujeción se utilizan como adhesivos una reacción química, la fundición del material o resinas fotosensibles [39].

El procedimiento general consiste en pegar la zona de empalme sobre almohadillas autoadhesivas existentes en bandejas de empalmes, rodeándose con una bisagra autoadhesiva, o con manguitos termo contráctiles (*sleeves*), los cuales poseen un nervio central que le proporcionan robustez al empalme. Estos se adhieren al empalme a través de calor; el manguito posee un color generalmente verde que se va tornando más oscuro a medida que se le proporciona calor. Cuando se torna totalmente negro, indica que ya está bien sellado el empalme. Por último estos se colocan a su vez en una bandeja dentro de la caja de empalme.

3.6.2.2. Conectores ópticos

El conector óptico es un dispositivo que une dos fibras ópticas, de manera repetible con bajas pérdidas ópticas de conexión. Generalmente las pérdidas que se originan en las conexiones se deben a los desplazamientos laterales de los ejes de las fibras.

Los conectores se utilizan generalmente para la terminación de fibras ópticas, ya sea para conectorización a otras fibras o a paneles de distribución de señal, en los que es necesariamente imprescindible este tipo de elementos.

Para poder realizar un enfrentamiento entre dos conectores de fibra óptica, bien tipo fibra a fibra, o fibra a panel, es necesario la utilización de un elemento denominado adaptador que permite un correcto posicionamiento enfrentado de dos fibras, ya sean idénticas y diferentes.

Cualquier conector está constituido básicamente por un casquillo o férula, un cuerpo, una cápsula o corona y un manguito descargador de tensión, que se detallan a continuación [35]:

- El casquillo, férula o ferrule es la porción central del conector que contiene a la fibra óptica y puede estar fabricado a partir de cerámica, acero o plástico. En la mayoría de los conectores existentes, el casquillo cerámico ofrece las menores pérdidas por inserción y la mejor receptividad.
- La cápsula y el cuerpo pueden ser de plástico, y para realizar la conexión, la cápsula se puede atornillar, cerrar girando o ajustar con un muelle.
- El manguito descargador de tensión libera de tensiones a la fibra óptica.

A continuación se muestra una imagen con los elementos comunes de un conector genérico [35]:

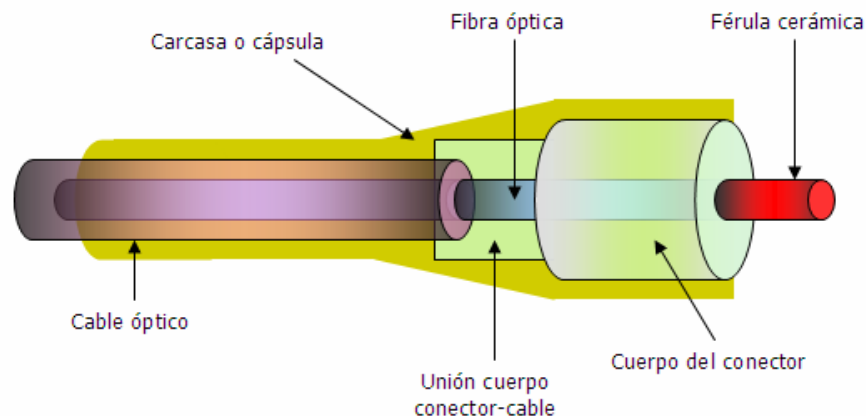


Figura 78: Elementos básicos de un conector de fibra óptica

La fibra se monta a lo largo de la férula cilíndrica, cuyo diámetro coincide con el diámetro del revestimiento de la fibra, y cuya misión es alinear y proteger mecánicamente a la fibra. El extremo final de la fibra llega al final de la férula, que suele ser pulido y alisado. El pulido de la férula puede ser de dos formas [39]:

- PC (Physical contact) o contacto físico
- APC (Angled Physical contact) o contacto físico angular

La diferencia entre pulido de férula PC y APC reside en que las férulas a conectorizar de cada conector, pueden enfrentarse en ángulo recto respecto al eje de la fibra (PC), o bien con cierto ángulo de acople entre ambos (APC). A continuación se muestra una imagen diferenciativa entre un pulido de férula PC y APC.

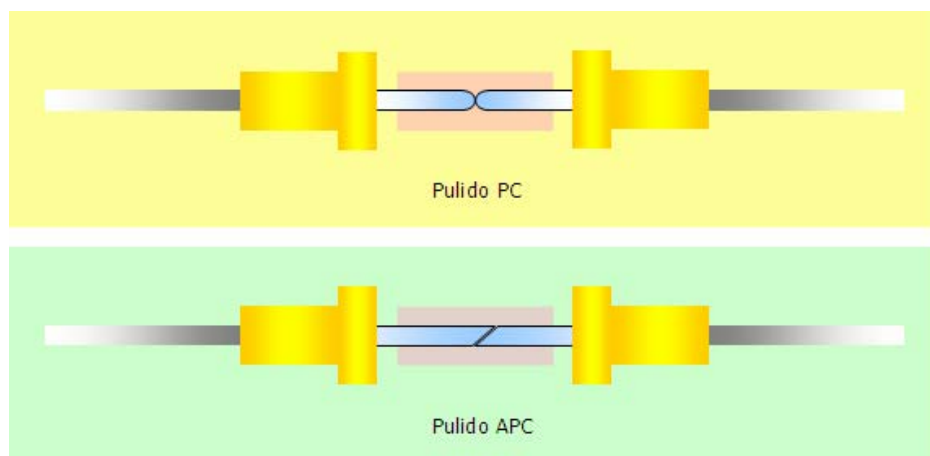


Figura 79: Tipos de pulido de la férula o ferrule

La férula se monta en el cuerpo del conector que está unido a su vez al cable de la fibra. Una carcasa protege la unión entre el conector y el cable de fibra. A diferencia de los conectores electrónicos la mayoría de los estándares de conectores de fibra carece de polaridad macho/hembra, por ello, para los conectores de fibra se acoplan a través de adaptadores.

Por último, cabe destacar que la mayoría de los conectores suelen tener un *pigtail* añadido, que es un cable de una sola fibra acabado en punta.

Existen en el mercado una gran variedad de conectores de fibra óptica debido a la complejidad del problema de unión entre dos fibras ópticas y a la gran cantidad de fibras diferentes existentes. Los conectores que habitualmente se utilizan para terminar una fibra óptica son los conectores ST, LC, FC, SC, bicónico, SMA, FDDI, MT-Array y D4, y sus características principales se encuentran detalladas en el apéndice IV del presente documento [38].

3.6.3. Acopladores ópticos

El acoplador óptico también se conoce comúnmente como adaptador óptico, y consiste en una transición mecánica necesaria para poder dar continuidad al paso de la luz de un extremo conectorizado de un cable de fibra óptica a otra. Es por tanto, un componente pasivo.

En general, los acopladores actúan como pequeñas cajas de tambor que reciben un conector de cada lado produciendo una adaptación o acople óptico con la mínima pérdida posible para el enlace. Actúan por tanto como distribuidores o combinadores de señal, realizando multiplexaciones y demultiplexaciones en longitud de onda, la construcción de otros componentes ópticos e incluso la monitorización de sistemas [38].

Se utilizan generalmente en los distribuidores para facilitar la desconexión y el cambio rápido, acoplando el *pigtail* (o cable de terminación del conector determinado) que se haya empalmado al cable de fibra con el panel de conexión o *patchcord* que se conecta a los equipos receptores o transmisores. También se utilizan para conectar un tramo de fibra a los equipos de medida.

Las configuraciones en las que se pueden presentar los acopladores son las que se enumeran a continuación [35]:

- **Acoplador puro:** estructura con N puertos de entrada y M puertos de salida ($M > 2$). Este dispositivo divide el campo que entra por uno de los puertos de entrada entre los M puertos terminales de salida
- **Divisor (*splitter*) y *tap*:** estructura con 1 puerto de entrada y N puertos de salida ($N > 2$). Este dispositivo divide el campo que entra por el puerto de entrada entre los N puertos terminales de salida. La diferencia entre un divisor y un tap es el elevado coeficiente de acoplamiento en este último.
- **Combinador:** estructura con N puertos de entrada y 1 puerto de salida ($N > 2$). Este dispositivo combina la señal que entran por los N puertos de entrada, originándose una única señal por el puerto Terminal de salida.

El funcionamiento general de un acoplador, ya sea acoplador puro, divisor o combinador puede estar basado en dos modos principalmente: acoplo por fusión o acoplo por división de potencia, que se detallan a continuación.

3.6.3.1. Tipos de acopladores ópticos

El funcionamiento de un acoplador puede venir dado por uno de los siguientes que se explican a continuación.

▪ *Acoplo por fusión*

En el acoplo por fusión el objetivo es acercar los núcleos de las fibras entrantes en el acoplador lo suficiente como para que pueda existir una transferencia de potencia efectiva entre modos. Se fabrican por el método de prueba y error, y su mayor problema es que dependen de la longitud de onda. En el proceso de funcionamiento existirán pérdidas adicionales que indicarán si el dispositivo es bueno o no [39].

En general, el acoplamiento de modos entre fibras es factible únicamente entre fibras monomodo, dado que en las fibras multimodo existen diferentes modos de transmisión en la fibra y el resultado no sería el esperado.

A continuación se muestra una imagen del funcionamiento del acoplador por fusión:

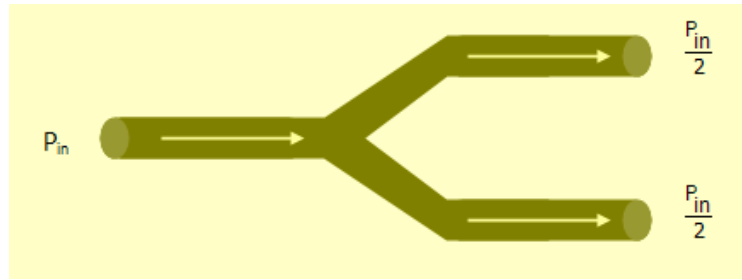


Figura 80: Acoplador por fusión

▪ *Acoplo por división de potencia*

En el acoplo por división de potencia la información que entra por el puerto de entrada se reparte equitativamente por todas las puertas de salida y de forma homogénea. Este proceso de división de la potencia lleva asociada unas pérdidas, por lo que la potencia de salida de una puerta cualquiera responde a la siguiente ecuación [38]:

$$Potencia_{salida} = \frac{Potencia_{entrada}}{N} - Pérdidas \quad (100)$$

Este tipo de acopladores se pueden fabricar empalmando en cascada varios acopladores entre sí, pero normalmente se fabrican utilizando técnicas de óptica integrada, donde el camino óptico se va dividiendo a base de estructuras en “Y”. Estos acopladores no dependen de la longitud de onda, lo que hace que sean más flexibles y utilizados que los acopladores por fusión.

En la figura 81 que se muestra a continuación, se refleja el funcionamiento del acoplador por fusión:

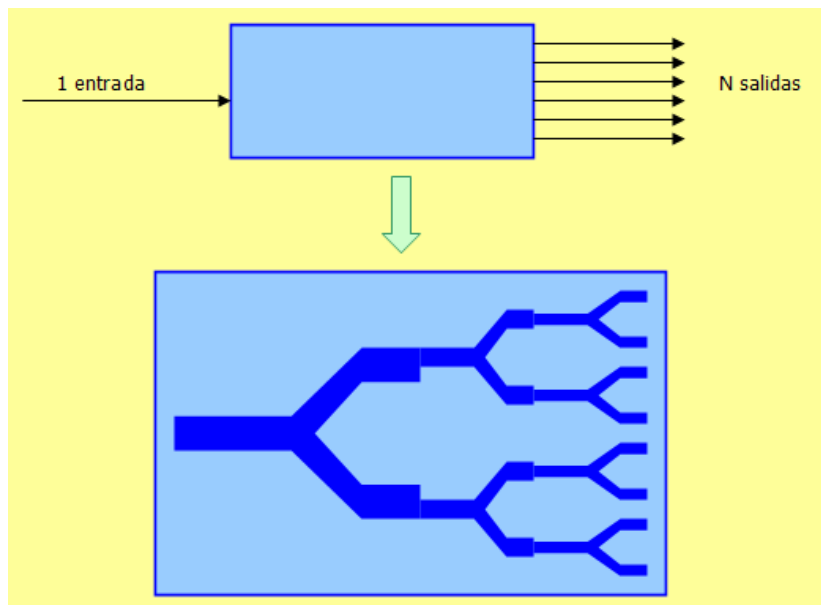


Figura 81: Acoplador por división de potencia

La caracterización de los acopladores, así como el principio de funcionamiento y los parámetros más importantes se encuentran detallados en el apéndice IV del presente documento.

3.6.3.2. Divisores ópticos (*splitters*)

El divisor óptico es un tipo concreto de acoplador muy utilizado en redes de fibra óptica, y el elemento principal en una red PON para FTTH.

Las principales características que hacen atractivo al divisor como elemento de distribución de señales procedentes de una fibra hasta múltiples fibras ópticas son las siguientes [39]:

- Pérdidas de inserción muy baja, obtenida a partir de la diferencia entre la entrada y cada una de las salidas del divisor.
- Poseen un espectro lineal de longitud de onda
- Alta uniformidad entre las diversas salidas del divisor
- Elevado aislamiento entre puertos, mayores que 55 dB
- Alta compactación
- Estabilidad térmica para uso externo

Para garantizar el correcto funcionamiento y las características anteriores, los divisores suelen producirse bajo una tecnología impresa denominada **PLC** (*Planar Lightwave Circuit*), donde las guías de onda del componente son impresas sobre un sustrato de cuarzo, similar al de los chips de silicio. Así se obtiene además de una gran compactación dimensional, una optimización de las pérdidas de retorno, línea del espectro y alta uniformidad [42].

Comparativamente, se pueden presentar los resultados obtenidos a partir de la fabricación de dos divisores ópticos de 1 x 8 con tecnologías distintas. El primer ejemplo, se muestra un divisor producido en tecnología tradicional **FBT** (*Fused Biconical Taped*) o por fusión bicónica, utilizado usualmente en redes híbridas de fibra y coaxial [42].

En la figura 82 [42], se muestra un gráfico en el que se puede observar claramente las pérdidas de inserción máximas y mínimas del sistema, así como la uniformidad. Las pérdidas de inserción máximas corresponden a la salida de fibra verde (1) y poseen el valor $IL_{\max} = 10.8$ dB; por otro lado las pérdidas de inserción mínimas corresponden a la salida de fibra azul oscuro (8) y poseen el valor $IL_{\min} = 7.8$ dB. Por lo tanto, el valor de la uniformidad, que es la diferencia entre ambos valores, es de $U = 3.0$ dB.

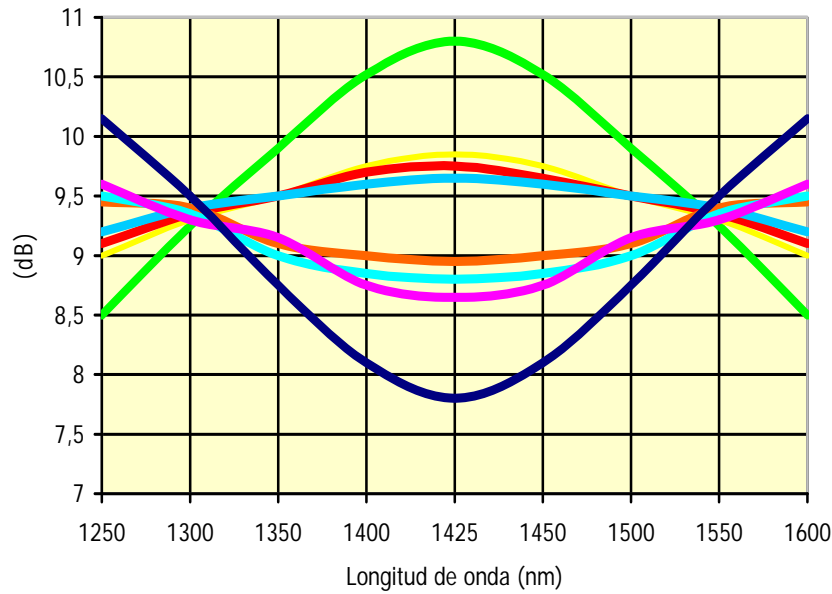


Figura 82: Divisor óptico FTB 1x8

El segundo ejemplo, muestra un divisor producido en tecnología impresa PLC, utilizado usualmente en redes FTTH, según la figura 83 [42].

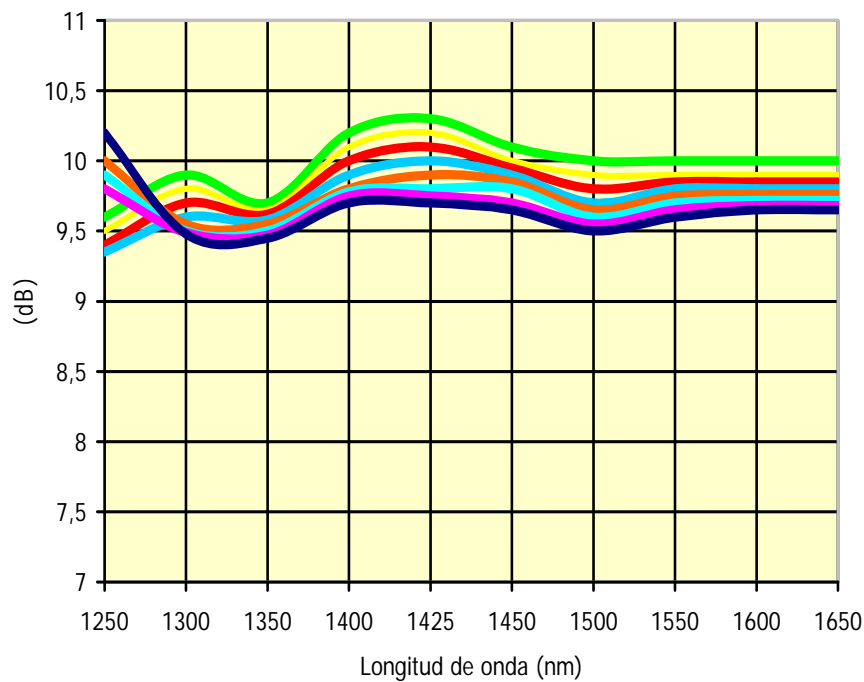


Figura 83: Divisor óptico PLC 1x8

En el gráfico de la figura 83, se puede observar claramente las pérdidas de inserción máximas y mínimas del sistema, así como la uniformidad. Las pérdidas de inserción máximas corresponden a la salida de fibra verde (1) y poseen el valor $IL_{\max} = 10.3$ dB; las pérdidas de inserción mínimas corresponden a la salida de fibra azul oscuro

(8) y poseen el valor $IL_{\min} = 9.3$ dB. Por lo tanto, el valor de la uniformidad, que es la diferencia entre ambos valores, es de $U = 1.0$ dB.

Observando ambos gráficos en modo comparativo, se puede verificar una mejor respuesta en todo el espectro de onda de operación y mejor uniformidad en el segundo caso, es decir, divisores fabricados a partir de tecnología impresa PLC. Si se añade a esto una reducción del valor de pérdidas de inserción posible, estas características convierten a este elemento como componente esencial de una red óptica pasiva, teniendo en cuenta que supone un alto porcentaje del presupuesto de instalación de la red.

En cuanto a las características físicas obtenidas por la producción en tecnología PLC de un divisor óptico son muy importantes. La compactación permite que dicho componente sea instalado sin mayores problemas en las bandejas de cajas de empalme de uso muy común en el mercado, haciendo flexible el proyecto, dimensión e instalación de las nuevas redes ópticas.

Otra diferencia de los tradicionales divisores FBT, es que éstos últimos pueden ser instalados en centrales de equipos y para uso interno, mientras que los divisores PLC son también mecánicamente y térmicamente adecuados para aplicaciones en ambientes externos, con una muy baja variación en sus funciones y características cuando se exponen a variaciones térmicas de temperatura y humedad, incluso siendo testado, en inmersión en el agua, ítem anteriormente impracticable en divisores FBT.

A continuación, se muestra una tabla con las especificaciones más importantes de los divisores ópticos de 1 x 2 hasta 1 x 64 [42].

Parámetro	Unidad	Especificación					
		1 x 2	1 x 4	1 x 8	1 x 16	1 x 32	1 x 64
Pérdidas de inserción máximas	dB	3.4	7.3	10.8	13.5	16.7	20.4
Uniformidad IL máxima	dB	0.6	1.0	1.0	1.2	1.5	1.8
PDL máximo	dB	0.20	0.25	0.25	0.30	0.40	0.40
Pérdidas de retorno mínima	dB	55					
Directividad mínima	dB	50					
Temperatura de operación	°C	-40 a +85					
Temperatura de almacenamiento	°C	-40 a +85					
Ciclo térmico máximo	°C	-40 a +75					
Tracción de fibra máxima	Kg	0.23 en 250 μ m					
Inmersión máxima en agua 340 horas	°C	+43, PH 5.5					
Vibración máxima aleatoria	Hz	10 - 2000					
Impacto máximo a 1.8 m altura	Caídas	+8					
Choque térmico máximo	°C	+100					
Rango de longitudes de onda	nm	1260 a 1600					
Longitud de la fibra	m	Entrada = 2; Salida = 2					

Figura 84: Especificaciones técnicas más importantes de los divisores ópticos

En la figura 85, se muestran las características y aplicaciones más importantes de los divisores ópticos comerciales más comunes del mercado.

Características	Relación de acoplamiento 1% al 99% Bajas pérdidas de inserción Bajo PDL Excelente uniformidad Alta directividad Bi-direccionalidad Ambientalmente estable y confiable
Aplicaciones	Telecomunicaciones CATV Bucle al abonado FTTH Aplicaciones LAN (Redes de área local) Equipos de medición Sensores de fibra óptica

Figura 85: Principales aplicaciones y características de los divisores ópticos

Una de las características de la tabla anterior de la figura 85, hace referencia a la bidireccionalidad del divisor, es decir, la capacidad de dividir una señal en varias señales de salida a través de un reparto equitativo de potencia; y la capacidad de realizar la operación inversa, es decir, actuar como un combinador y por tanto, mezclar las señales procedentes de las salidas (ahora actúan como entradas de señal) y poder originar una única señal de salida por el puerto de entrada. Es por ello, que a lo largo del presente documento quedan explicados correctamente los combinadores ópticos, dado que las características y aplicaciones son idénticas a los divisores ópticos.

Por último, se muestra a continuación una imagen de un divisor óptico real de 1 x 8, es decir, una entrada y 8 salidas [43].

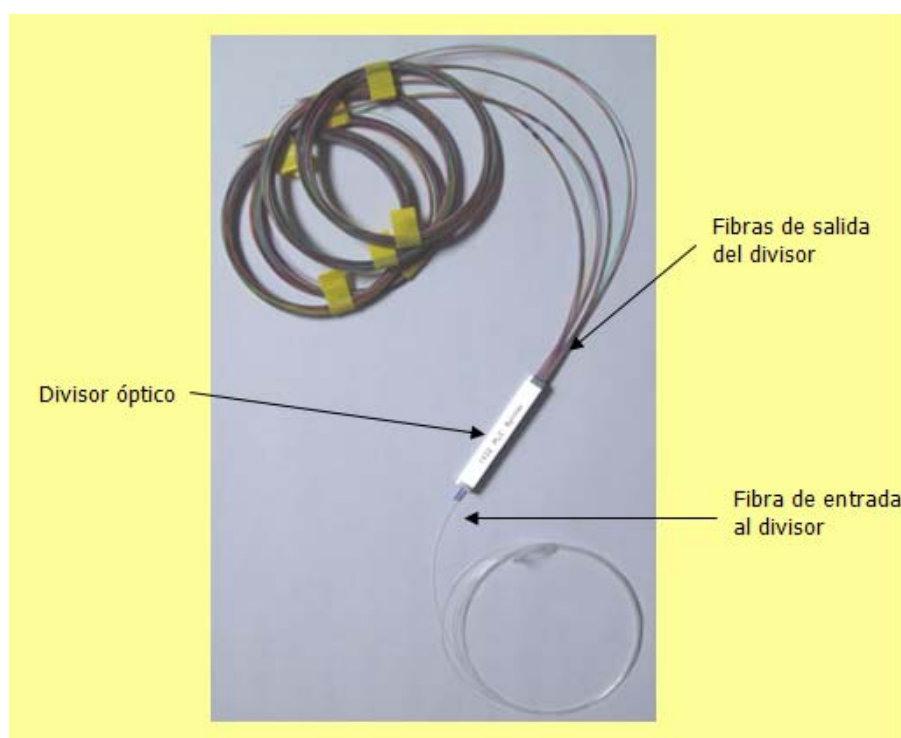


Figura 86: Divisor óptico 1x4

3.6.3.3. Acoplador en estrella pasivo

Un acoplador en estrella pasivo o PSC (*Passive star coupler*) consiste en un dispositivo de N puertos de entrada, y N puertos de salida que, idealmente, reparte por igual la potencia óptica que entra por cualquiera de sus entradas entre sus N puertos de salida, según la siguiente ecuación [39]:

$$P_{salida} = \frac{P_{entrada}}{N} \quad (108)$$

Un PSC puede ser construido concatenando acopladores de 2x2, y son muy útiles en redes cruzadas de fibra óptica. Por tanto, implementar un PSC de N puertos, se necesitan concretamente $\frac{N}{2} \log_2 N$ acopladores de 2x2. Así por ejemplo, un PSC con 8 puertos requiere 12 acopladores de 2x2. Esta arquitectura es muy poco flexible, ya que se requiere que N sea potencia de 2, $N=2^n$, con $n=1$.

A continuación se muestra una imagen de un acoplador en estrella pasivo construido mediante la concatenación de acopladores de 2x2.

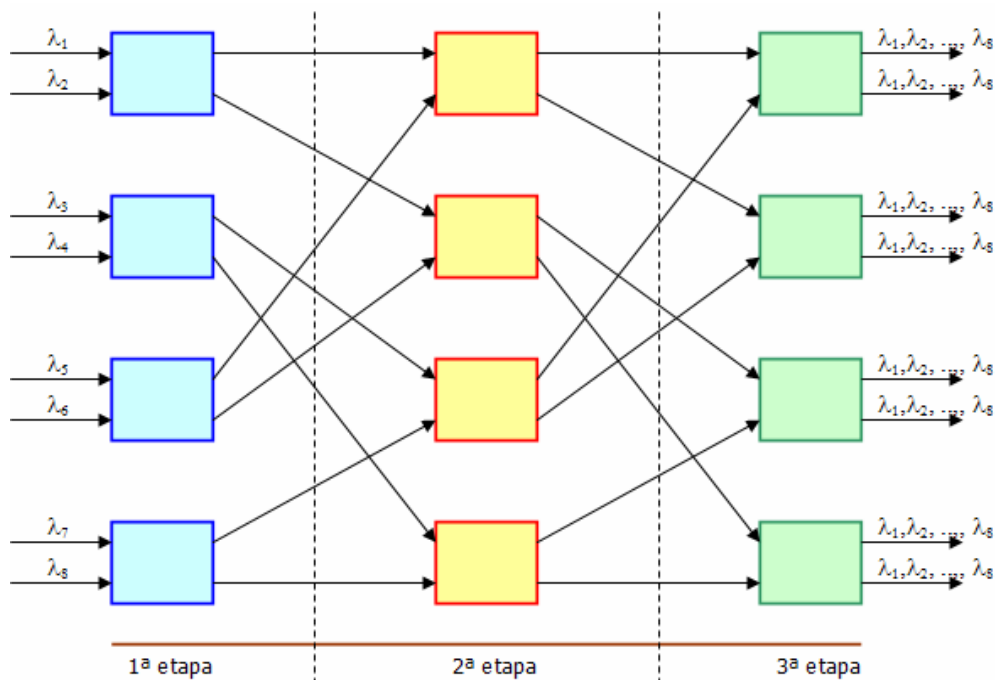


Figura 87: Acoplador tipo PSC

3.6.4. Aislador óptico

Un aislador óptico consiste en un dispositivo que retransmite la luz en una única dirección. Son muy importantes en los sistemas de comunicaciones ópticos para evitar que las reflexiones de las señales alcancen a otros dispositivos y puedan dañarlos, como por ejemplo a los láseres.

La figura 88 muestra un esquema con el funcionamiento de este dispositivo. Como se puede observar, la luz puede entrar al dispositivo tanto por la derecha como por la izquierda. La luz de entrada no está polarizada, por lo que al encontrarse el primer polarizador sólo pasará la polarización vertical. Luego, el rotador de Faraday gira 45° a la derecha la polarización de la luz que lo atraviese independientemente de la polarización de ésta. El segundo polarizador transmite la luz cuya polarización esté 45° desplazada hacia la derecha respecto a la vertical. En este caso, la luz sale del aislador [39].

Si se considera el caso en el cuál la señal entra por la derecha del aislador óptico, ésta no saldrá por el otro extremo dado que el polarizador 1 transmite la luz polarizada verticalmente y la señal llega a éste con polarización horizontal, por lo que queda bloqueada.

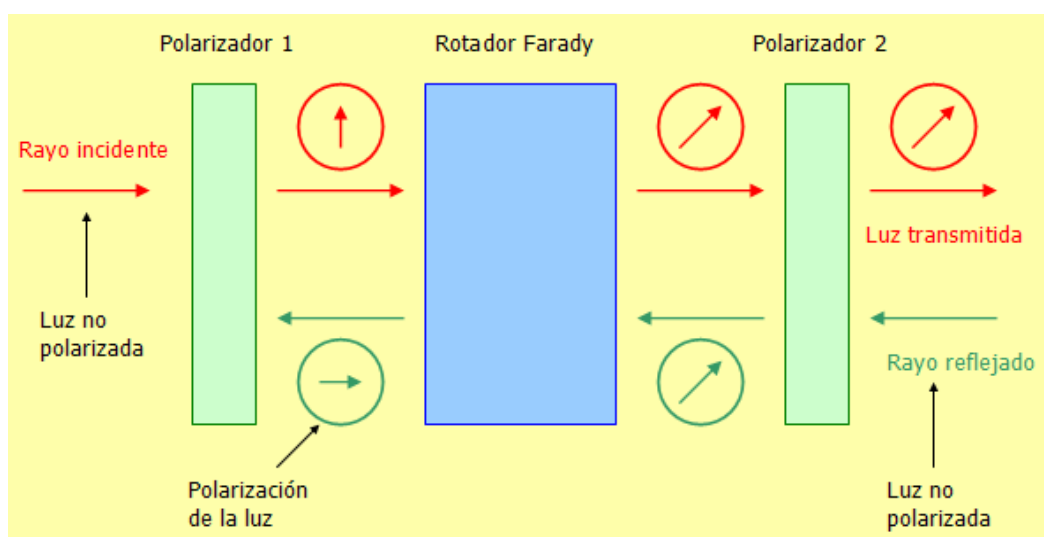


Figura 88: Aislador óptico de configuración básica

3.6.5. Circulador óptico

El circulador óptico es un tipo de aislador óptico con varios puertos cuya funcionalidad es permitir el paso de toda la luz que entra por uno de sus puertos hacia el siguiente puerto. Como se muestra en la figura 89, la luz que entra por el puerto 1 se dirige al puerto 2, la entrante por el puerto 2 se dirige al puerto 3 y así sucesivamente.

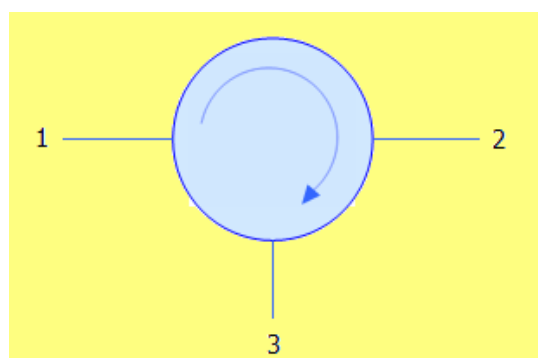


Figura 89: Esquema de un circulador óptico

Los circuladores son muy útiles para construir dispositivos ópticos denominados *Add-Drop*, formado por un circulador seguido por filtros ópticos o *Gratings de Bragg* de fibra. Estos dispositivos permiten extraer o añadir una longitud de onda. A la entrada del circulador llega una señal WDM que es transmitida hacia el puerto 2 del circulador, donde hay un *grating de bragg* de fibra tal que refleja la señal a λ_2 , de forma que al volver al puerto 2 del circulador, es redirigida al puerto 3 de éste. De esta forma se ha extraído un canal concreto de la señal WDM de entrada [38].

Para realizar el efecto contrario, es decir, añadir una señal WDM en λ_2 , se emplea un acoplador, ya comentado en el apartado anterior.

A continuación se muestra una imagen de la posibilidad que ofrece estos dispositivos para extraer señales de una determinada longitud de onda [39].

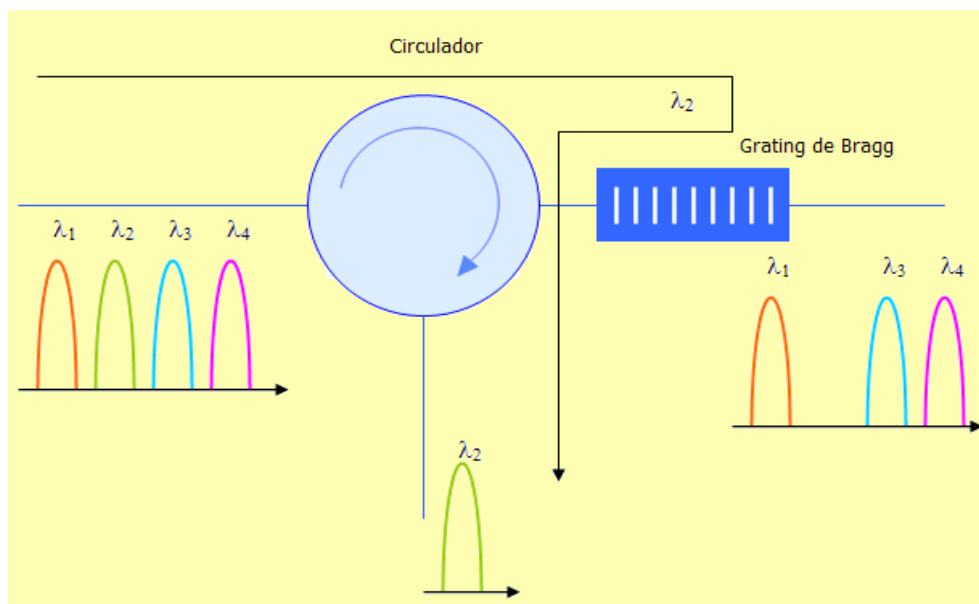


Figura 90: Esquema de un dispositivo *Add-Drop*

De esta forma, se consigue independizar y extraer del resto una señal de longitud de onda determinada para su utilización en otros sistemas.

3.6.6. Filtros ópticos

Un filtro óptico es un dispositivo capaz de seleccionar una banda de longitudes de onda y eliminar el resto. Las principales aplicaciones de los filtros ópticos y que lo convierten en un dispositivo clave en los sistemas de comunicaciones ópticas son:

- La eliminación del ruido, introducido por otros elementos ópticos, como por ejemplo los amplificadores.
- La ecualización de la respuesta de los amplificadores ópticos.
- La selección de canales en sistemas WDM.

Para realizar estas aplicaciones de forma óptica estos dispositivos deben tener unas pérdidas de inserción reducidas. Idealmente, su banda de paso debe ser plana para evitar así la distorsión de la señal. Además, la banda de transición de su respuesta de ser muy abrupta para evitar la diafonía (*crosstalk*) con los canales próximos, y su comportamiento general debe ser independiente de la polarización de la señal.

Existe una gran variedad de dispositivos ópticos que pueden trabajar como filtros. Entre los más comunes se encuentran [38]:

- Los filtros de **interferencia**, contruidos a partir de materiales con distinto índice de refracción de forma alternativa sobre un sustrato cristalino.
- Los filtros de **Fabry-Perot**, basados en resonadores de Fabry-Perot o cavidad rodeada de dos espejos ultra reflexivos.
- Los filtros de **Mach-Zender**, constituido por dos acopladores y dos tramos de fibra de distinta longitud.
- Los filtros **sintonizables** ópticos-acústicos, basados en el cambio de las propiedades que experimentan los materiales al ser atravesados por ondas acústicas.
- Los filtros **acopladores**, que separan diferentes longitudes de onda, a modo de acoplador óptico.

El detalle y caracterización de estos filtros, se encuentra disponible en el anexo IV del presente documento.

3.6.7. Adaptadores de fibra

Los adaptadores de fibra, son básicamente elementos ópticos pasivos que permiten la transición mecánica necesaria para poder dar continuidad al paso de luz del extremo conectorizado de un cable de fibra óptica a otra.

Se comportan como pequeños tambores o cajas que reciben un conector de cada lado produciendo un acople óptico, con la mínima pérdida posible. Se utilizan en los distribuidores para facilitar la reconexión y cambio rápido, acoplando el *pigtail* que se haya empalmado al cable de fibra con el cordón de conexión que se conecta a los equipos receptores o emisores. También se utiliza para conectar un tramo de fibra a los equipos de medición.

En la figura 91 se muestra una imagen con diversos adaptadores ST, SC, LC y FC válidos para sus conectores correspondientes, disponibles en el mercado [35].



Figura 91: Adaptadores de fibra óptica

3.6.8. Distribuidores de fibra óptica

Los distribuidores de fibra óptica son conocidos comercialmente como paneles de parcheo o *Patch Panel*. En ellos termina el cable de fibra óptica de un enlace final, y permite que dicha fibra sea conectada al equipamiento óptico mediante cordones de conexión de fibra.

Los distribuidores suministran un punto de acceso al equipamiento y a la planta del cable de fibra. Las fibras individuales pueden interconectarse, probarse o intercambiarse rápidamente entre el equipamiento óptico. Los paneles de conexión permiten también un etiquetado fácil y de las fibras, y proporcionan un punto de demarcación del enlace.

En general, son diseñados con dos comportamientos: uno contiene los receptáculos de cabecera o adaptadores, y el segundo se utiliza para la bandeja de empalmes y almacenamiento del exceso de fibra. Las bandejas de administración de los cordones de conexión son opcionales para algunos paneles de conexión hacen posible el almacenamiento ordenado de longitudes excesivas de cordones de conexión.

Los distribuidores ópticos se encuentran disponibles en versión de montaje en pared o montaje en bastidores y se sitúan frecuentemente cerca del equipo terminal (dentro del alcance del cordón de conexión o *Patch Cord*). El panel de cabecera o frontal del panel de conexión contiene el adaptador que permite al conector del cable aparearse con el conector apropiado del cordón de conexión hasta el equipo. Proporciona una conexión de bajas pérdidas ópticas después de muchas conexiones.

A continuación se muestra una imagen de un repartidor óptico de fibra para conectorización final de 8 fibras [44].



Figura 92: *Distribuidor de fibra óptica*

3.6.9. Cajas de empalme

Las cajas de empalme proporcionan un medio de protección del entorno tanto al cable de fibra (ahora ya desnudo o pelado) como a los empalmes. Los empalmes exteriores se protegen dentro de una caja de empalme, la cual posee en un extremo unos tubos a través de los cuales se inserta el cable de fibra óptica.

Existen cajas para montajes interiores y exteriores. Las cajas de tipo exterior deben estar fabricadas a prueba de intemperie y con un sellado impermeable. La capacidad de estas cajas es variable, y existen cajas que permiten resguardar empalmes hasta de cuatro cables de diámetros distintos. Algunos ejemplos son la caja Torpedo, caja Mondragón, etc.

El cable de fibra se mantiene sujeto mediante abrazaderas y el miembro de refuerzo central se amarra fuertemente al soporte de la caja. Los miembros de refuerzo metálicos se llevan siempre a tierra para evitar derivaciones eléctricas.

La caja en su interior posee bandejas de empalme o casetes, que se utilizan para proteger y mantener los empalmes individuales tanto mecánicos como por fusión, y además existen los denominados organizadores de fibra óptica. Existen bandejas disponibles para muchos tipos de empalmes, incluyendo varios empalmes mecánicos con marcas registradas, empalmes por fusión desnudos, empalmes por fusión con funda termocontráctil, etc.

A continuación se muestra una imagen de varios tipos de caja de empalme preparada para el almacenamiento y protección de empalmes de fusión o mecánicos [44].



Figura 93: Cajas de empalme de fibra óptica

3.6.10. Cordones de conexión y latiguillos de fibra óptica

Los cordones de conexión de fibra óptica, conocidos también como *Patch Cord*, son análogos a los cables de conexión eléctrica. Un cable de conexión es una fibra de pequeña longitud con una protección ajustada y gruesa, cubierta y/o chaqueta protectora y conectores en ambos extremos.

La cubierta siempre es de color naranja para fibra óptica multimodo y de color amarillo para las fibras monomodo. Este producto viene ensamblado en fábrica, bien en longitudes estándar o bien en longitudes a medida según el requerimiento.

Los cordones de conexión han tenido tradicionalmente muchos usos, principalmente para conectar el equipamiento óptico instalado con el panel de conexión de fibra. Su flexibilidad permite que se puedan usar en localizaciones ajustadas, dentro de cabinas y armarios repletos de equipamiento. Se pueden utilizar para conexiones cruzadas de fibra, para conectar el equipamiento de prueba a los enlaces de fibra óptica, y el radio de curvatura de un cordón de conexión es muy pequeño, generalmente del orden de 2.5 cm.

Los cordones de conexión se deben amarrar suavemente con abrazaderas para asegurarlos de una manera ordenada. Las longitudes en exceso se pueden almacenar en bandejas o atar en círculos suaves con un radio superior al radio de curvatura mínimo establecido por el fabricante.

Si se parte por la mitad un cordón de conexión, cada mitad se convierte en un latiguillo, conocido popularmente como *pigtail*. Un latiguillo de fibra se utiliza para

terminar una fibra con un conector; éste se empalma a la fibra por medio de empalmes mecánicos o de fusión para proporcionar una terminación de calidad con un conector de fábrica.

Tanto los cordones como los latiguillos de conexión que se utilicen en una instalación de cable de fibra óptica, deben tener el mismo diámetro del núcleo y si es posible del revestimiento, así como también conectores compatibles entre sí y con los adaptadores del distribuidor de fibra.

A continuación se muestra gráficamente la diferencia entre un cordón de conexión y un latiguillo de conexión de fibra [35].

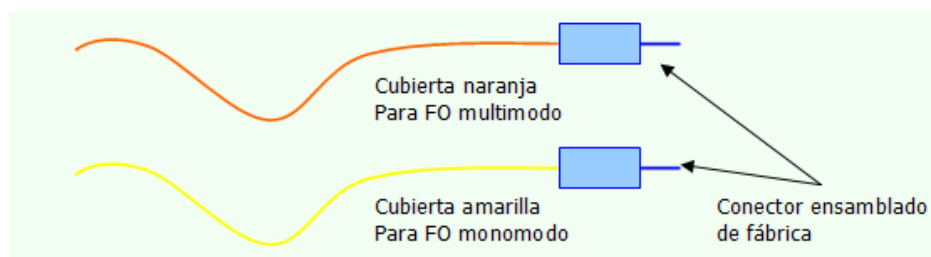


Figura 94: *Cordón de conexión*



Figura 95: *Latiguillo de conexión*



Figura 96: Cordones y latiguillos de conexión de fibra óptica

3.6.11. Dispositivos emisores y receptores de la luz

El desarrollo de los distintos dispositivos de transmisión y recepción de luz, se encuentran detallados en el apartado 3.4 del presente capítulo.

3.6.12. Multiplexores

Los multiplexores y demultiplexores ópticos son dispositivos activos de la red esenciales en los sistemas WDM o de multiplexación por división en longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing*). Estos dispositivos se pueden clasificar en dos grandes grupos: basados en *gratings* o rejillas de difracción, y basados en filtros ópticos, que se detallan a continuación.

3.6.12.1. Multiplexores basados en rejillas de difracción

Los multiplexores y demultiplexores basados en rejillas de difracción, se basan en el fenómeno de la difracción de Bragg. La señal de entrada es reflejada por la rejilla, la cual separa espacialmente las distintas longitudes de onda de la señal de entrada, y mediante una lente estas señales son enfocadas cada una en una fibra óptica. El empleo

de lentes de índice gradual en lugar de lentes convencionales simplifica el alineamiento de las señales y permite obtener un dispositivo más compacto [38].

A continuación se muestran dos imágenes: en la figura 97 [39] se representan los esquemas de los multiplexadores ópticos basado en rejillas de difracción, con lente convencional y con lente de índice gradual; en la figura 98 se muestran los esquemas de los demultiplexadores ópticos basados en rejillas de difracción, con lente convencional y con lente de índice gradual.

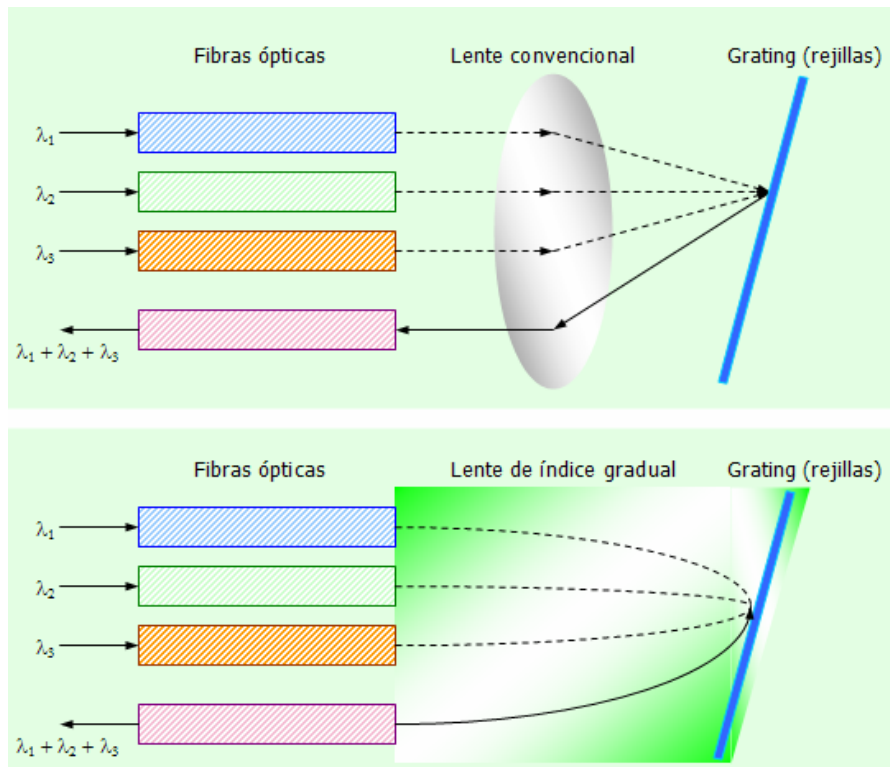
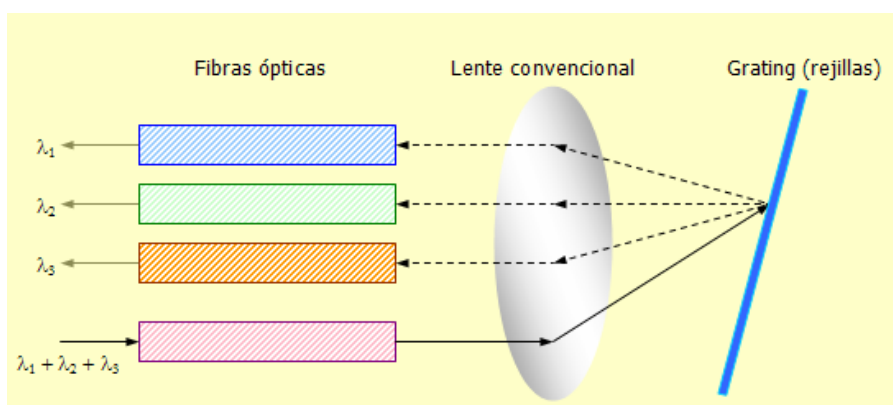


Figura 97: Multiplexores ópticos basados en rejillas



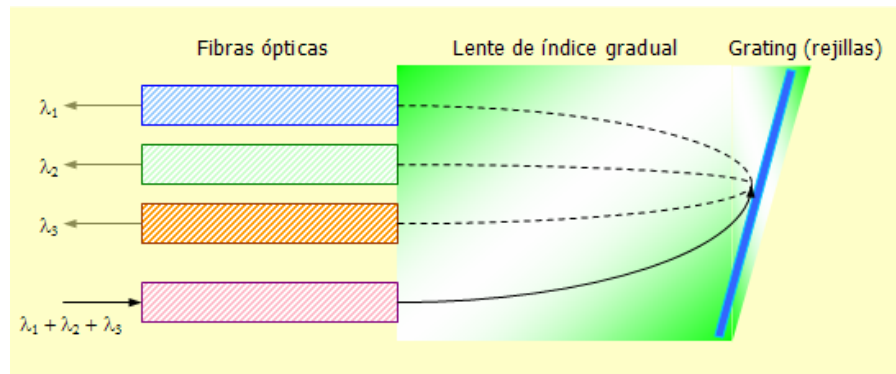


Figura 98: Demultiplexores ópticos basados en rejillas

3.6.12.2. Multiplexores basados en filtros

Los multiplexores y demultiplexores basados en filtros se apoyan en el fenómeno de la interferencia óptica para seleccionar una longitud de onda. A partir de la combinación de varios filtros se puede construir multiplexores y demultiplexores con N canales, donde $N = 2^n$.

En la figura 99 [39] se muestra un multiplexor de 4 canales construido mediante la combinación de 3 filtros. En esta estructura la diferencia de longitud entre los brazos de los filtros es tal que la potencia óptica de las dos entradas sólo aparece en una salida.

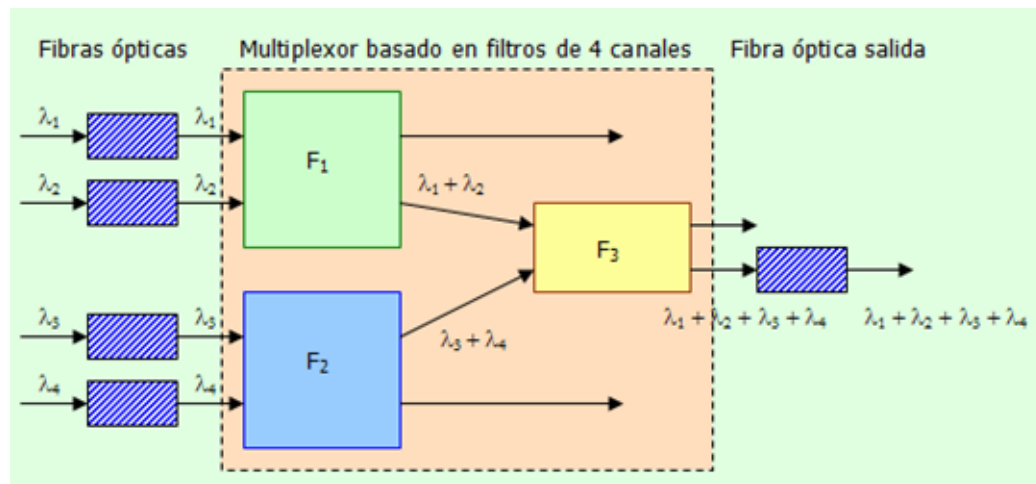


Figura 99: Multiplexor óptico de 4 canales con 3 filtros de 2x2

Por otra parte, la estructura de un demultiplexor es similar. En la figura 100 que se muestra a continuación se puede observar un demultiplexor de 8 canales, construido a partir de 7 filtros, con una separación de 100 GHz entre canales consecutivos. En cada filtro las longitudes de onda se reparten entre cada salida [39].

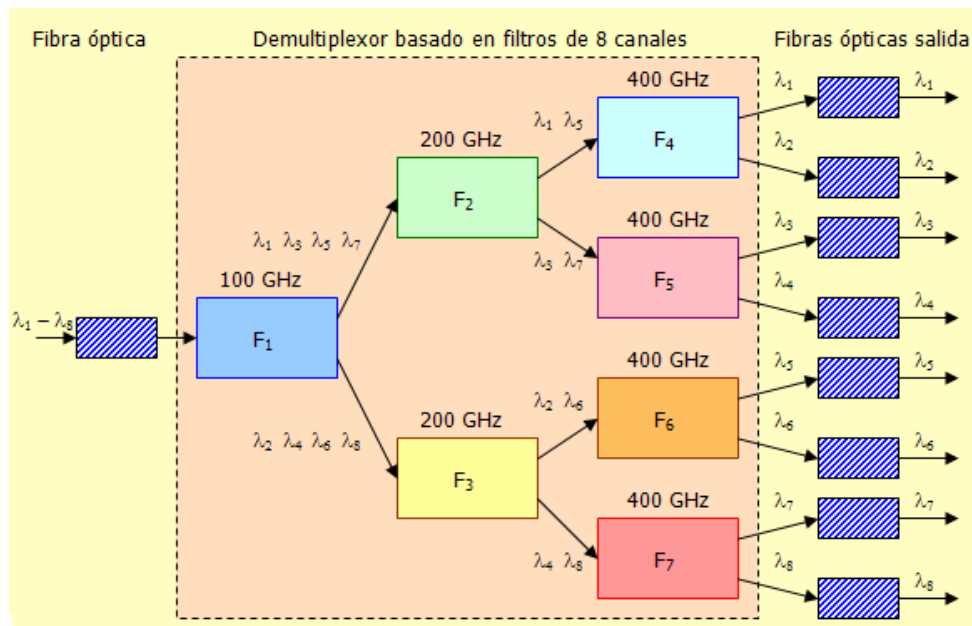


Figura 100: Demultiplexor óptico de 8 canales con 7 filtros de 2x2

En el primer filtro la separación frecuencial entre los canales de cada salida es de 100 GHz. Por la rama superior se dirigen los canales λ_1 y aquellos que estén respecto de éste a una distancia que sea múltiplo impar de 100 GHz, mientras que por la rama inferior se dirigen los canales λ_2 y aquellos que estén a una distancia respecto de éste que sea múltiplo par de 100 GHz. En las sucesivas etapas la separación frecuencial es el doble de la anterior logrando demultiplexar los 8 canales en total.

3.6.13. Amplificadores ópticos

Cuando una señal se propaga por la fibra óptica se necesitan emplear regeneradores de señal para amplificar la misma, debido a los efectos de la atenuación y la dispersión, así como de la longitud máxima permitida para la fibra entre el transmisor y receptor, que no alcanza a para cubrir toda la distancia del enlace.

Inicialmente se empleaban regeneradores o repetidores eléctricos. Estos realizan una conversión de la señal del dominio óptico al eléctrico, amplifican la señal eléctrica y la resincronizan, recuperando su forma, y finalmente realizan una conversión del dominio eléctrico al óptico. Atendiendo al procesado que se efectúa sobre una señal, los regeneradores se clasifican en tres tipos [38]:

- **1R (Regeneración).** Amplifican la señal. Son por tanto transparentes al formato de la modulación y se pueden aplicar a señales analógicas. Por el contrario, añaden ruido y no contrarrestan los efectos de la dispersión y de las no linealidades.
- **2R (Regeneración y reformación).** Además de amplificar, se recupera la forma de la señal transmitida, por lo tanto este tipo de amplificadores sólo son aptos para señales digitales.

- **3R (Regeneración, reformatión y resincronización).** Además de amplificar y regenerar la señal recuperando la forma, la sincroniza. Este tipo de regeneradores cancela los efectos de las no linealidades y de la dispersión.

A continuación se muestra en la imagen 101 [38] las ondas de entrada y de salida de los diferentes tipos de regeneradores 1R, 2R y 3R.

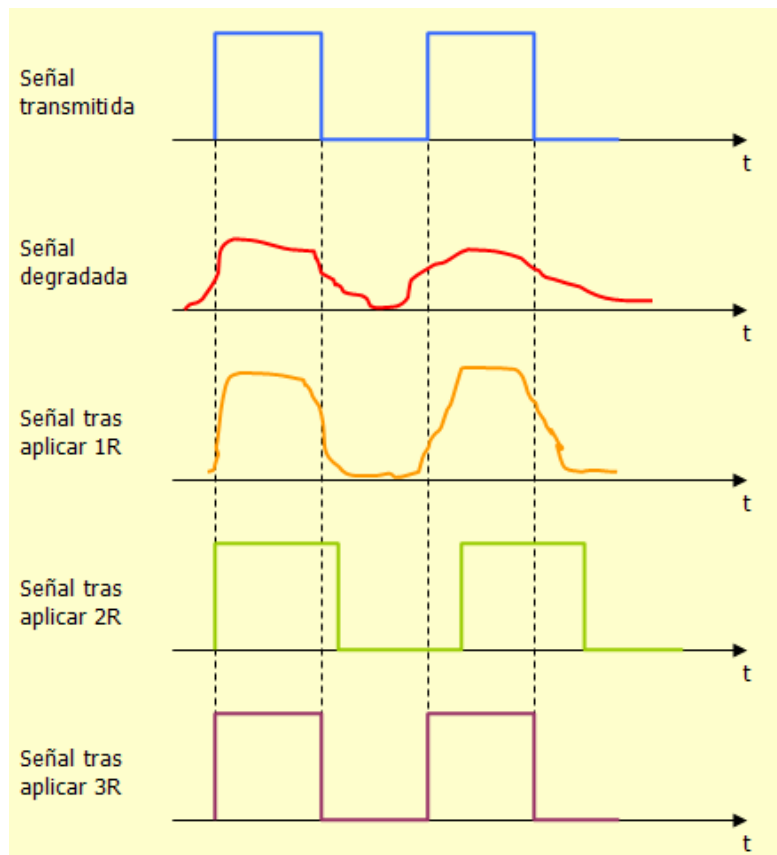


Figura 101: Comportamiento general de los diferentes regeneradores de señal

Estos regeneradores que actúan en el dominio eléctrico, no son adecuados cuando se trabaja con sistemas con varias longitudes de onda y de alta velocidad, además de ser caros y complejos debido al uso de electrónica de alta frecuencia. Por ello surgen los amplificadores ópticos.

3.6.13.1. Características generales de un amplificador óptico

Los amplificadores ópticos generan una réplica de la señal de entrada pero con mayor nivel de potencia, operando completamente en el dominio óptico. Además pueden emplearse en otros procesos como la conmutación, la demultiplexación, o bien en la conversión de longitud de onda, aprovechando su comportamiento no lineal.

Las ventajas de estos dispositivos frente a los regeneradores son las siguientes [38]:

- Funcionamiento independiente del tipo de modulación de la señal.
- Amplio ancho de banda, por lo que amplifica varias longitudes de onda simultáneamente.
- Mayor simplicidad y por tanto menor probabilidad de fallos.
- Menor coste que los regeneradores.
- Permiten emplear reflectómetros ópticos para el testeo y supervisión de las líneas de fibra óptica.
- Pueden ser integrados.

Por otro lado, las limitaciones más importantes que supone el empleo de amplificadores ópticos son las siguientes [39]:

- Introducen un ruido adicional que es amplificado junto con la señal.
- Al no regenerar la señal se produce un efecto acumulativo de la dispersión.
- Su ancho de banda es finito por lo que limita el número de canales en los sistemas WDM.
- Su ganancia no es uniforme en todo el rango de amplificación, por lo que debe ser ecualizada.

Existen diferentes tipos de amplificadores ópticos, clasificados de acuerdo a dos criterios:

- Según su aplicación, se clasifican en amplificadores de línea, preamplificadores y amplificadores de potencia.
- Según su estructura y funcionamiento, se clasifican en amplificadores ópticos de semiconductor y amplificadores ópticos de fibra dopada.

La definición, desarrollo y características de estos amplificadores se encuentra disponible en el apéndice IV del presente documento.

3.6.14. Conversores ópticos de longitud de onda

En una red óptica de comunicaciones la información no es transmitida en todo su recorrido en una misma longitud de onda. Para realizar un máximo aprovechamiento de las longitudes de onda disponibles se realiza el proceso de conversión de longitudes de onda.

Un primer esquema para la realización de este proceso es un tratamiento optoelectrónico de la señal original, como se muestra en la figura 102. El sistema equivale a un regenerador electrónico. La señal de entrada incide en un receptor óptico obteniéndose una réplica eléctrica de la entrada. La señal eléctrica actúa sobre un diodo láser que emite una longitud de onda distinta de la señal de entrada, realizándose así la conversión de longitud de onda.

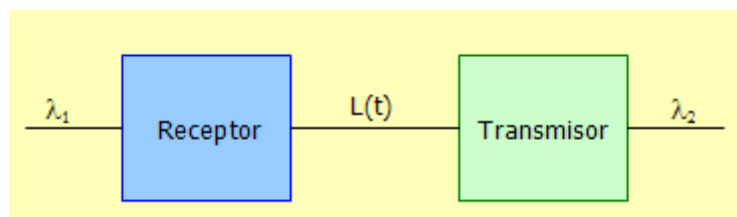


Figura 102: Comportamiento de un conversor de longitud de onda

Para realizar este proceso sin necesidad de cambiar la señal al dominio eléctrico se emplean técnicas en las que intervienen procesos no lineales en los que a partir de la longitud de onda inicial y de otra auxiliar se genera una nueva señal con las mismas características que la señal inicial salvo en la longitud de onda. Concretamente los más utilizados son [38]:

- Conversor de longitud de onda basado en XGM, contruidos a partir de amplificadores ópticos semiconductores.
- Conversor de longitud de onda basado en filtros y SOA, contruidos por un filtro con un SOA en cada brazo.
- Conversor de longitud de onda basado en FWM, contruidos utilizando una configuración a partir del fenómeno de mezclado de cuarta onda.

El detalle de todos y cada uno de los conversores citados anteriormente se encuentra disponible en el apéndice IV del presente documento.

Capítulo 4

Procedimiento y recomendaciones de diseño e instalación de una red FTTH

A lo largo del presente capítulo, se describirá de una forma sencilla e ilustrativa el procedimiento de planificación, diseño e instalación de una red FTTH cualquiera, cumpliendo los parámetros esenciales de alta calidad y bajo coste sobre una estructura física determinada.

Para ello, se realizará un estudio detallado de todas las recomendaciones necesarias y requerimientos básicos o mínimos requeridos a la hora de diseñar e instalar una red FTTH para satisfacer las necesidades presentes y futuras en cuanto a capacidad, distancia de transmisión y calidad se refiere. Estos parámetros aparecen reflejados en el *Capítulo 2 Introducción al sistema FTTH* del presente proyecto, y los más relevantes son: alcanzar una capacidad mínima de 1 Gbps a distancias superiores a 10 km, y con un período de vida de más de 30 años.

El capítulo se encuentra dividido en dos bloques claramente diferenciados: una primera sección dedicada a los pasos necesarios para el diseño de una red FTTH, y una segunda sección dedicada a la aplicación de diseño e instalación de una red FTTH basado en un caso real, cuyo período de diseño y ejecución se ha llevado a cabo a lo largo del último trimestre de 2008 y primer trimestre de 2009.

4.1. Diseño y planificación de una red FTTH

A lo largo de este bloque se describirán los parámetros más interesantes e importantes a tener en cuenta en una planificación de red de FTTH. Sin embargo no se llevará a cabo un estudio completo de la red a todos los niveles, sino que tan sólo se realizará del nivel físico de la red en su configuración pasiva, dado que la infraestructura suele ser la más desconocida en los ámbitos de estudio de las redes actuales.

4.1.1. Consideraciones generales para el diseño de red

Para poder llevar a cabo un buen diseño de una red FTTH, se han de conocer previamente ciertos datos y conceptos que recojan brevemente las principales características de dicha red. Así pues, se han de tener en cuenta las generalidades que se presentan en las siguientes subsecciones.

4.1.2. Niveles de una red FTTH

No existe una estandarización definida acerca de los niveles de estructuración y funcionamiento de las redes FTTH, salvo a nivel físico. Sin embargo algunas entidades han desarrollado cierta caracterización de las redes FTTH, incluyendo niveles estructurales similares a los niveles OSI.

El más extendido entre los diseñadores de redes FTTH es el recogido en la propuesta Report 37/2001 de la Comisión Sueca de Tecnología de la Información (*Swedish TI-Commission*) [45], que recoge un diseño de niveles estructurales vertical según se recoge a continuación.

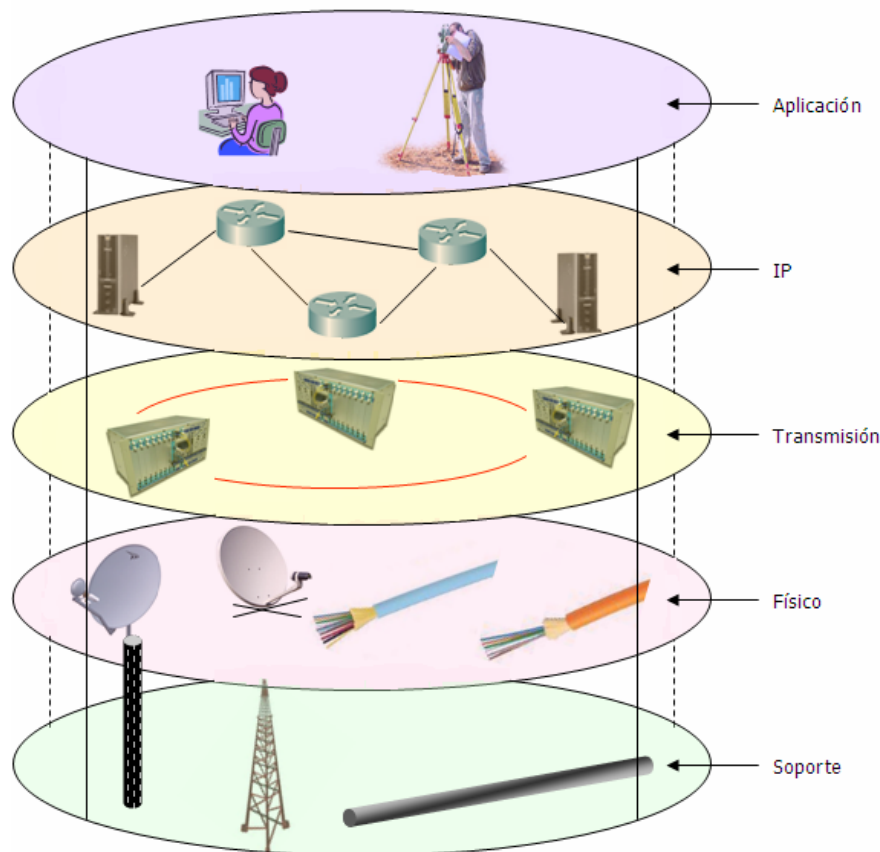


Figura 103: Niveles estructurales de una red FTTH

Tal y como se puede observar en el gráfico de la figura 103, la estructura global de una red FTTH se puede dividir en cinco niveles de actuación y operación, siendo estos [45]:

- **Nivel de soporte:** también se le denomina nivel de conductos. Es el nivel más bajo de la red física e incluye todos los conductos necesarios de la misma, especificando las dimensiones estándar, estructuras de antenas,

materiales de red y micro-conductos entre otros. Debe tener período de vida superior a 30 años. Gran parte de este nivel pertenece al diseño físico de una red FTTH y supone un importante porcentaje del total del coste de implantación de la misma. Es por ello que se debe ser muy exacto en la planificación, instalación y documentación, y que el material de todos los elementos implicados sea de alta calidad. Generalmente el propietario de la red es el encargado de este nivel.

- **Nivel físico:** en este nivel se incluye toda la infraestructura física en cuanto a medios y canales de transmisión se refiere. Contiene por tanto, los cables ópticos, microcables, fibras ópticas, productos de fibra soplada, fibra oscura y antenas transmisoras. Tanto la fibra óptica como el cable óptico deben poseer un período de vida mecánico similar al del nivel de conductos. No obstante, el período de vida de transmisión depende de servicios futuros requeridos sobre la fibra. Estos requerimientos futuros implican una mayor capacidad del canal, que la planificación presente debe prever.
- **Nivel de transmisión:** en este nivel quedan recogidas todas las conexiones lógicas por encima del nivel físico, es decir, hace referencia a los enlaces de transmisión entre nodos, así como permite un correcto funcionamiento de la red.
- **Nivel IP:** este nivel hace referencia al servicio global de Internet ofrecido por el operador de red hasta el usuario final, y en el que quedan definidos los enrutamientos entre usuarios.
- **Nivel de aplicación:** es el último nivel y el más cercano al usuario final. En él se incluye el equipamiento de usuario, es decir, el hardware, el software, los programas y la información descifrada.

El diseño y planificación objeto de estudio del presente capítulo está dirigido a los dos primeros niveles estructurales, nivel de soporte y nivel físico, siendo este último sobre el que más se incidirá, dado que es el que requiere mayor implicación en cuanto a trabajo de ingeniería de red se refiere. Por tanto, sólo se realizará un diseño detallado de una red PON pura, sin incluir elementos activos de red.

4.1.3. Infraestructura de fibra óptica

La infraestructura de fibra óptica se crea a través de una fina malla de conductos y cables entre una comunidad principal y el resto de comunidades que se denominan satélites. Esta red mallada ofrece elevada redundancia y por tanto, la posibilidad de balancear el tráfico de información utilizando diferentes caminos entre dos nodos cualesquiera [46].

Además, la infraestructura debe ofrecer la posibilidad de ser utilizada y/o propietaria de diferentes operadores de cable, operadores de telecomunicaciones,

proveedores de servicio u operadores neutros. La infraestructura debe estar abierta a la multipropiedad, servicios y transmisión.

Toda la información que viaja través de esta infraestructura lo hace a través del protocolo de comunicación IP. Esto implica que la información transmitida puede encontrar la mejor ruta o vía de transmisión en la red, asegurando siempre rutas alternativas. La redundancia entre nodos en una misma comunidad y entre comunidades es imprescindible para crear una red robusta. A continuación se muestra en la figura 104 una imagen representativa de esta infraestructura [46].

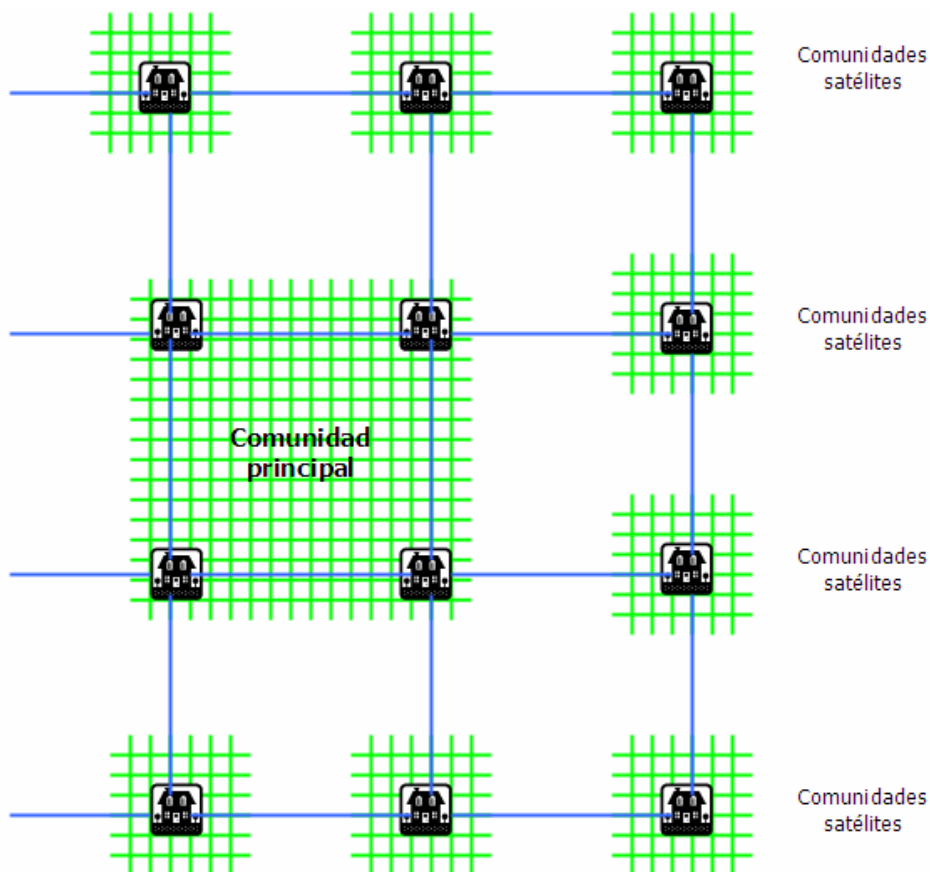


Figura 104: Infraestructura general de fibra óptica

4.1.3.1. Terminología según topología de red

Una red global de fibra óptica, supone una topología de red completa que supone la máxima extensión, y que engloba el mayor volumen de tráfico posible, la mayor capacidad, los mayores requerimientos habilitados sobre la misma, etc. La significancia de esta red, supone que la misma debe de estar dotada con una elevada protección y seguridad, capaz de hacerla lo menos vulnerable posible.

Sin embargo, no se realizan los estudios en base a la red global, sino en base a divisiones más pequeñas generalmente territoriales. Así pues, la red global de fibra se

subdivide, de mayor a menor escala en: red nacional, red regional, red municipal, red urbana y red de acceso.

- ***Red nacional***

La red nacional conecta todas las regiones de un mismo país y se encuentra conectada con redes internacionales de otros países. Este tipo de red posee una elevada seguridad y generalmente suele tener pocos propietarios. A continuación se muestra un esquema general de la red nacional española de fibra [6].

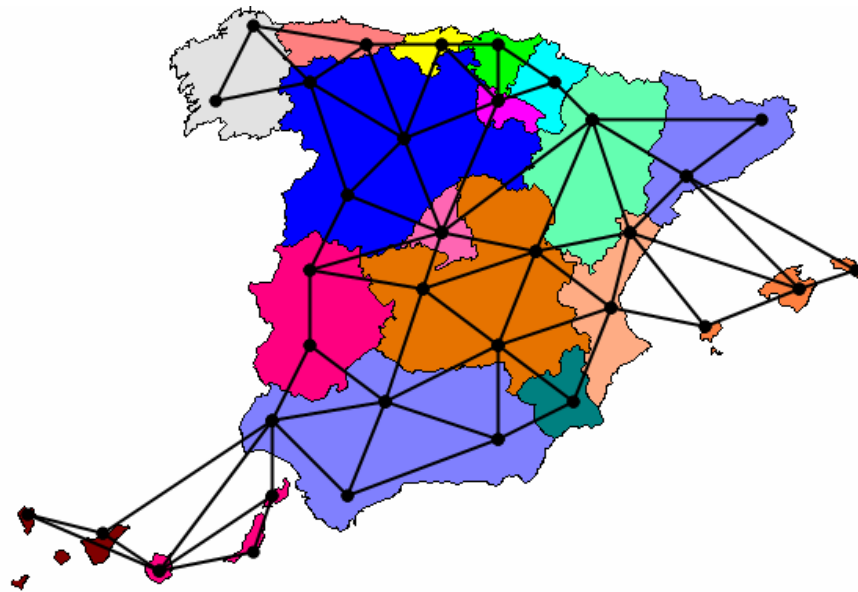


Figura 105: *Red nacional de fibra óptica*

- ***Red regional***

La red regional conecta una comunidad entera o una región determinada, conectándose interregionalmente con otras comunidades a su vez. Las redes que no poseen regiones diferenciadas, frecuentemente consisten en conectar distintas redes municipales entre sí correspondientes a distintas comunidades. La red regional siempre se encuentra conectada a la red nacional. A continuación se muestra un esquema genérico de una red regional española.

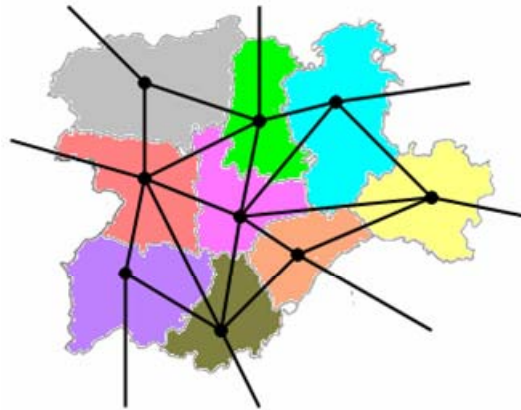


Figura 106: Red regional de fibra óptica

- **Red municipal**

La red municipal conecta redes entre sí procedentes de diferentes municipios que han configurado aún una comunidad completa. Estas redes se conectan a escala superior con las redes regionales, y a escala inferior se conectan con las redes locales o urbanas, e incluso en algunos casos, con las redes de acceso directamente. Estas conexiones se realizan a través de un nodo principal de comunidad.

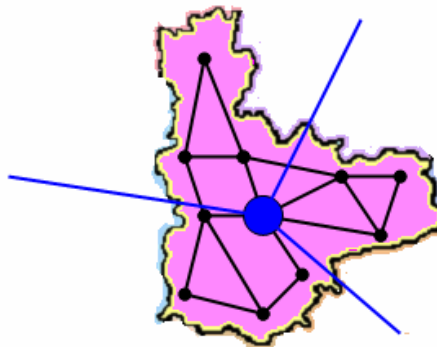


Figura 107: Red municipal de fibra óptica

- **Red local o urbana**

Una red local o urbana consiste en una red que se extiende a lo largo de una ciudad o áreas con elevado grado de población suficientemente separadas como para no poder ser integradas dentro de una red municipal. Con esta estructura es muy sencillo establecer soluciones de bajo coste para construir redes de acceso hasta los usuarios. Estas redes están directamente conectadas a un nodo principal o un nodo de distribución secundario (redundante), capaz de dirigir el tráfico a la red municipal inmediatamente superior.

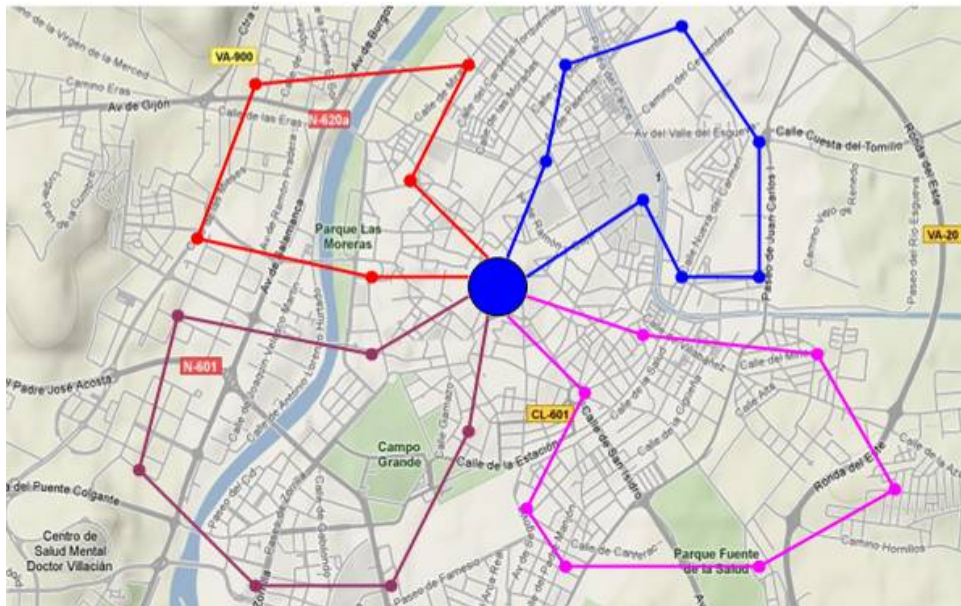


Figura 108: Red local o urbana de fibra óptica

▪ Red de acceso

La red de acceso permite conectar a uno o varios usuarios finales a un nodo de acceso, ya sea secundario o primario. En esta red se incluyen todos aquellos usuarios privados, que demandan servicios en pisos, chalets, oficinas, hospitales, administraciones públicas, etc. Además, estas redes son compatibles a nivel de servicio con otros sistemas que también llegan hasta los hogares y que forman parte de las redes de acceso, tales como el acceso inalámbrico fijo o FWA (*Fixed Wireless Access*), WLAN (*Wireless LAN*) y estaciones base para telefonía móvil. También han de prestar servicio a otros sistemas no menos importantes en los hogares, empresas y otros estamentos como son el equipamiento de seguridad, alarmas de incendio, sistemas de videovigilancia, etc. [6]

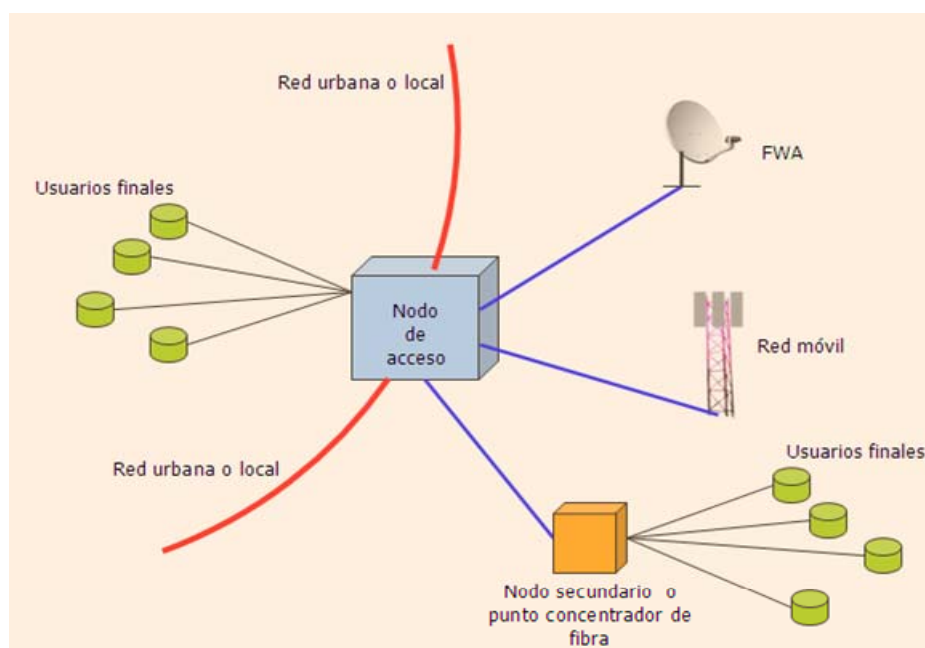


Figura 109: Red de acceso de fibra óptica

El propietario de las redes de acceso es muy dispar. Así pues, y por regla general, el despliegue corre a cargo de las operadoras de cable, aunque actualmente son muchas las empresas que invierten en este tipo de infraestructura, actuando a modo de operadores neutros que alquilan su infraestructura a empresas de telecomunicaciones.

En las redes de acceso de fibra, el cable de la propia red llega hasta los hogares (FTTH) o bien hasta los concentradores de los edificios (FTTB). Los demandantes de servicio final pueden ser bloques de viviendas, chalets, áreas industriales, escuelas, hospitales, oficinas, etc. Debido a la disparidad y variedad de usuarios finales posibles, el diseño de una red de acceso de fibra óptica es la parte más compleja del proceso de diseño. Cada red de acceso es única y requiere una planificación especial para poder ser optimizada en todos los aspectos.

En las redes FTTH la red de acceso queda definida como la conexión existente entre el nodo de usuario de una vivienda u hogar privado hasta el primer equipamiento activo de la red, generalmente un nodo de acceso (ya sea primario o secundario). Esta es la única parte de la infraestructura de fibra donde no existen requerimientos de redundancia y la red de fibra suele conectarse en topología de estrella desde el nodo de la central hasta el usuario final. También pueden incluir la conexión hasta el nodo de central de todo tipo de equipamientos en áreas públicas.

En muchas áreas con redes de acceso privadas, el equipamiento activo de la red suele colocarse cerca de los edificios, muchas veces denominado nodo de hogar o nodo final. Este tipo de redes suelen tener muy poca longitud, y propician la concentración de nodos de hogar en torno a un nodo de acceso. Con esta estructura arbolada se reducen los costes de implantación de red, pero no ofrecen la mejor escalabilidad y desarrollo.

La distancia entre el usuario final y el nodo de acceso puede variar dependiendo del área de estudio entre 10 m y 100 km como máximo, aunque la mayoría de las redes de acceso FTTH se encuentran entre 300 m y 2000 m [6].

Sin embargo, para poder combinar estas distancias con una capacidad de servicio del orden de 1 Gbps, se requiere la utilización de fibra óptica monomodo. A día de hoy, las fibras multimodo pueden ser utilizadas en despliegues FTTH, pero siempre para enlaces cortos, inferiores a 500 m entre el nodo de central y el abonado final. Sin embargo este tipo de redes de acceso basadas en fibra multimodo implican un equipamiento activo mucho más compacto, ahorrando espacio en las salas de equipos de los edificios [46].

4.1.4. Elección de los elementos de la red FTTH

Para poder optimizar al máximo el rendimiento de una red FTTH se han de escoger los elementos de red más apropiados en cada caso. Sin embargo, existen una serie de recomendaciones que indican qué elementos son los más apropiados para cualquier tipo de red FTTH.

4.1.4.1. Diseñar una red o enlace FTTH

Para el dimensionamiento de una red FTTH o un enlace, se necesitan establecer y concretar los siguientes parámetros [6]:

- Distancia máxima de transmisión
- Balance de atenuación óptica para el sistema
- Tipo de fibra
- Atenuación por conectores
- Atenuación por unión o empalme
- Reflexión (hacia atrás) máxima
- Tipo de conectores
- Margen de envejecimiento o período de vida mecánica

Algunos sistemas también necesitan especificar:

- Distancia de enlace mínima permitida
- Atenuación óptica mínima permitida

A lo largo de los siguientes apartados, se describen las particularidades más importantes que permiten decidir los elementos apropiados para cumplir los requisitos de distancia de enlace, atenuación óptica y capacidad requeridos.

4.1.4.2. Tipo de fibra óptica

La elección de la fibra óptica viene determinada por varios parámetros, siendo los más importantes y restrictivos la dispersión y la atenuación óptica. Las ventajas de la fibra monomodo -elevada capacidad de transmisión y la baja atenuación óptica-, convierten a este medio en el más atractivo para las redes FTTH.

El hecho de utilizar fibra óptica monomodo en FTTH permite homogeneizar la red de acceso con el resto de la red, que ya utiliza este tipo de fibra, dotándola de transparencia y uniformidad. Además simplifica el servicio, el mantenimiento y el desarrollo. Por lo tanto, se recomienda la utilización de este tipo de fibra para la red de acceso FTTH. Así lo hace la recomendación IEEE 1000Base-LX y 10Gbase-LX, que señala como opción primaria la utilización de fibras G.652B, C o D para FTTH [47] [48].

Inicialmente las primeras redes de acceso de fibra utilizaban fibra óptica multimodo. Esto se debía a que el coste de implantar una red FTTH con fibra multimodo es más barato, puesto que el equipamiento activo es más simple y supone menos coste de instalación. Sin embargo, poseían una limitación importante, la longitud del enlace, puesto que se alcanzaban distancias cortas (del orden de 2 km) condicionadas por las pérdidas de la fibra.

Por lo tanto, no se recomienda la utilización de fibra óptica multimodo salvo en dos excepciones [6]:

- En áreas de población densa con distancias inferiores a 500 m entre el usuario final y el equipamiento activo.
- En áreas de desarrollo donde la instalación ha comenzado con fibra multimodo y donde la misma infraestructura ha de dar servicio a todo el área.

En ambos casos, se recomienda la utilización de fibra multimodo tipo “giga”, ya sea tipo OM3 o en su defecto OM2, para poder alcanzar cualquier punto del área.

4.1.4.3. Número de fibras por usuario final

El número total de fibras por usuario final o abonado viene determinado por el grado de utilización de componentes activos opto-eléctricos existentes en la red y en la instalación técnica. La mayoría de los sistemas punto a punto se basan en la utilización de dos fibras por enlace, uno dedicado al tráfico de subida y otro al tráfico de bajada.

A la hora de diseñar una red, se han de tener en cuenta las necesidades actuales y previsiones futuras en cuanto a requerimientos de servicio de refiere, tales como ampliaciones de servicios básicos, inclusión de alarmas, etc. Actualmente existen sistemas basados en tecnología WDM, donde los canales de subida y bajada discurren a través de la misma fibra, pero en diferentes longitudes de onda. Esto implica que el número de fibras, el volumen de ocupación de las mismas y los conectores se reducen a la mitad, ahorrando coste y espacio. Y además, para cambios futuros en la red, deberá de ser posible conectar dos fibras si así se requiriese para ampliar la capacidad de servicio. Por lo tanto [46]:

- Si la instalación se realiza mediante cable óptico tradicional (con menos prestaciones) en el último tramo, se recomienda utilizar dos fibras por enlace, aunque inicialmente sólo se utilizase una de ellas.
- Si la instalación se realiza mediante fibra soplada, sólo se recomienda utilizar una única fibra, con la ventaja que la utilización de esta técnica permite reemplazar la fibra en el tubo conductor por un cable bifibra de forma sencilla.

Por último, cabe destacar que no es necesario ensamblar las fibras no utilizadas a ningún conector, puesto que las fibras sobrantes se pueden almacenar en paneles de terminación o cajas de empalme.

4.1.4.4. Tipo de conectores

Los conectores que se utilizan habitualmente a nivel nacional, regional y municipal para conectar redes entre sí requieren mayor rendimiento y calidad que los empleados

para conectar usuarios finales en una red FTTH. Una condición básica que deben cumplir los conectores utilizados en una red FTTH es que deben de prestar la calidad requerida.

Se pueden utilizar diferentes tipos de conectores: SC, LC, MT... en función del precio, rendimiento y duración esperada, aunque existen algunas recomendaciones sobre cuál escoger en función de la red final, y son las que se enumeran a continuación [46]:

- Utilizar conectores SC, LC o MU para sistemas monomodo WDM que poseen una fibra por abonado.
- Utilizar conectores duplex de cualquier tipo para sistemas con dos fibras monomodo por abonado.
- Utilizar conectores duplex SC, LC o MT para sistemas multimodo con dos fibras por abonado.

Sin embargo existe cierta flexibilidad a la hora de combinar en una misma instalación diferentes conectores. Es decir, en un mismo sistema pueden utilizarse conectores LC para conectarse a un nodo primario y a la vez utilizar conectores SC en el lado del usuario final, aunque lo recomendable es homogeneizar la red utilizando conectores del mismo tipo.

Por último, los conectores de fibra se pueden ensamblar en campo o se pueden adquirir preconectorizados como latiguillos de parcheo. Es muy recomendable evitar realizar la conectorización entre la fibra y el cable en campo, dado que los conectores deben de tener buena calidad para evitar reflexiones que excedan la recomendación, o lo que es lo mismo, disminuyan el rendimiento.

4.1.4.5. Tipo de uniones entre fibras

Las uniones de fibra que poseen mejores prestaciones en cuanto a pérdidas se refiere, son las uniones por fusión, y son las más utilizadas en la actualidad. Sin embargo también suelen ser frecuentes los empalmes mecánicos.

Una buena fusión debe de tener típicamente unas pérdidas del orden de 0.1 – 0.2 dB de atenuación para fibras ópticas monomodo, según la recomendación ITU G.650. La atenuación producida por la unión entre fibras no es crítica en muchos sistemas, pero para poder asegurar un período de vida del empalme más duradero, se recomienda fusionar si la atenuación del mismo es superior a 0.3 dB [46].

Por otra parte, la atenuación máxima recomendada para cualquier tipo de fusión o empalme mecánico no debe de exceder los 0.3 dB de pérdidas. Y son las uniones por fusión las que ofrecen mejor rendimiento y las que cumplen, por regla general, dicho requisito [46].

Es necesario tener especial cuidado a la hora de estimar la atenuación producida por las fusiones o empalmes. La estimación de dicho parámetro no siempre es precisa y, aunque no es necesaria la verificación métrica de cada unión, sí que es necesario verificar la atenuación completa del enlace, para estudiar la contribución de cada unión al sistema.

4.1.4.6. Tipo de cable óptico

No menos importante es el tipo de cable óptico encargado de albergar la fibra óptica elegida. La elección del cable óptico atiende a dos necesidades básicas: si la instalación del cable es exterior o interior, y a las condiciones a las que se va a ver sometido el mismo como consecuencia del entorno.

- ***Instalación en interior***

Para llevar a cabo instalación de cable en zonas de interior tales como ICT de viviendas, patinillos de distribución en empresas e instituciones, etc. es recomendable la utilización de cables de fibra con pocas unidades, cables ópticos de interior o simplemente de fibra óptica, para poder ser introducidos más fácilmente en el interior de microconductos. Los cables pueden estar atados o engarzados entre sí mediante cintas o cualquier otro elemento holgado para poder organizarlos e instalarlos más fácilmente.

Siempre y cuando el número de fibras que discurren en el interior de un microconducto no sea superior a 8, se podrán instalar las fibras directamente sin necesidad de instalar cable óptico. Sin embargo, si el número de fibras que se han de manejar por el interior del tubo es superior a 8, es conveniente utilizar cables o microcables de fibra de interior [46].

- ***Instalación en exterior***

Si la instalación FTTH requiere la utilización de fibra a lo largo de largas distancias por el exterior, se recomienda la utilización de microcables o cables ópticos estándar para exterior. Esta técnica tiene algunas ventajas, ya que el cable esta muy rápidamente en su sitio y posteriores desarrollos pueden realizarse de manera flexible (microcables).

Por lo tanto, teniendo en cuenta que a lo largo de una red general FTTH existe una combinación de instalaciones en interior y en exterior, se pueden resumir las recomendaciones anteriores, en [46]:

- Utilizar fibras simples en el interior de microconductos o bien cables ópticos de interior o microcables hasta el punto de concentración de fibra en el edificio (generalmente una caja de concentración).

- Desde el concentrador de fibra del edificio hasta el nodo de acceso se recomienda la utilización de microcable instalado a través de conducto prediseñado para tal fin, o bien se recomienda utilizar cable óptico tradicional.
- Cuando no se utiliza un punto concentrador de fibra y la distancia es relativamente corta entre abonados y nodo de acceso, se puede utilizar la recomendación del primer punto.

4.1.5. Cálculo del balance óptico de una red FTTH

Una vez escogidos todos los elementos intervinientes en una red FTTH, tanto pasivos como activos, es necesario calcular el balance óptico del sistema. Este balance aportará información sobre las pérdidas máximas de la red, y por lo tanto incidirá directamente en la capacidad máxima de transmisión del sistema o en la distancia máxima de cada enlace, dado que ambos parámetros son inversamente proporcionales entre sí.

Dadas las restricciones actuales que existen en los núcleos residenciales en cuanto a infraestructura óptica se refiere, el parámetro mayormente limitante es la longitud máxima del enlace, o lo que es lo mismo, la longitud máxima de la fibra entre el nodo de acceso y el punto concentrador de fibra del edificio, o en su defecto hasta cada abonado.

Existe una fórmula general para el cálculo de la **longitud máxima de la fibra** en los términos anteriores, viene dada por la siguiente expresión lineal [6]:

$$L_{max} = \frac{P_{op} - a \cdot C_a - b \cdot S_a - n}{F_a} \quad (117)$$

Donde:

- L_{max} es la longitud máxima de la fibra en km.
- P_{op} es el margen de potencia máxima para el sistema opto-eléctrico en dB, calculado a partir de la diferencia entre la potencia óptica del transmisor y la sensibilidad del receptor.
- a es el número de conectores de empalme (dos conectores corresponden a una unión).
- C_a es la atenuación media de conector en dB/conector.
- b es el número de empalmes de fibra.
- S_a es la atenuación media de empalme de fibra en dB/empalme.
- n es el margen de envejecimiento, ratio de encendido-apagado, cambios de temperatura y otros parámetros que inciden en la atenuación de la señal.
- F_a es la atenuación de la fibra en dB/km.

A continuación se muestra una imagen que ejemplifica un caso cualquiera básico de cálculo de longitud máxima de fibra. Se trata de un enlace de fibra óptica monomodo con transmisión en 3ª ventana y con un margen de óptica de 7.5 dB.

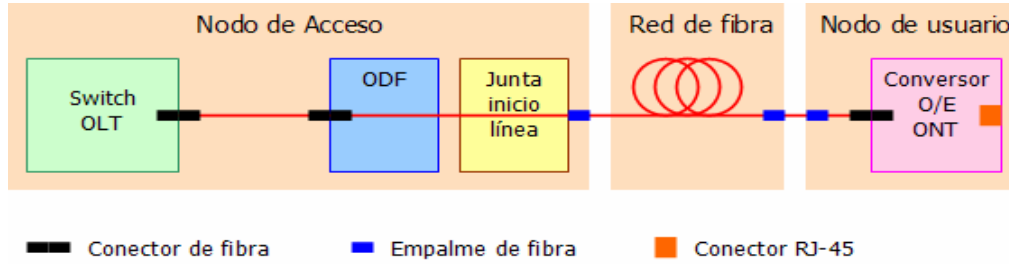


Figura 110: Ejemplo de red óptica

La imagen de la figura 101 muestra un enlace directo entre el nodo de acceso y el abonado final, a lo largo del cuál se producen empalmes y conectorizaciones de fibra. Concretamente, se pueden observar tres conectores de fibra ($a = 3$) y tres empalmes de fibra ($b = 3$).

En un enlace óptico en 3ª ventana, es decir a 1550 nm, a través de fibra óptica monomodo la atenuación típica de la misma es de 0.22 dB/km, luego también se conoce el parámetro $F_a = 0.22$ dB/km.

Tomando como datos genéricos el valor medio de atenuación de los conectores en 0.5 dB por conector ($C_a = 0.5$ dB/conector), el valor final de la atenuación introducida por los conectores a lo largo de la red es: $a \cdot C_a = 3 \cdot 0.5 = 1.5$ dB.

Por otra parte, se puede tomar como valor genérico el valor medio de atenuación por empalme de fibra como 0.3 dB por empalme ($S_a = 0.3$ dB/empalme), por lo que el total de atenuación introducida por las uniones entre fibras es: $b \cdot S_a = 3 \cdot 0.3 = 0.9$ dB.

Por último, es necesario dimensionar el parámetro de margen de envejecimiento y variaciones de temperatura, cuyo valor típico analítico es de 1.5 dB (aunque este valor es en muchas ocasiones arbitrario), luego $n = 1.5$ dB.

Teniendo en cuenta que el margen de potencia óptica máxima de transmisión es de 7.5 dB, y conociendo las atenuaciones parciales introducidas por los empalmes de fibra, los conectores y el margen de envejecimiento, se puede calcular la longitud máxima de la fibra óptica.

La distancia máxima de la fibra óptica entre el OLT y el ONT vendría dado por la expresión (117), que sustituyendo los valores anteriores queda de la siguiente manera:

$$L_{\max} = \frac{7.5 [dB] - 3 \cdot 0.5 [dB / conect.] - 3 \cdot 0.3 [dB / empalme] - 1.5 [dB]}{0.22 [dB / km]} \quad (118)$$

Operando la expresión se obtiene el resultado final de la longitud máxima de la fibra: $L_{\max} = 16,36$ km, por lo que en unidades enteras y atendiendo a que esta longitud debe ser máxima, se ha de escoger la unidad inmediatamente inferior a la cifra calculada. Por lo tanto la longitud de la fibra óptica debe cumplir $L_{\text{fibra}} \leq 16$ km.

4.1.6. Diseño de la instalación

El siguiente apartado detallará los aspectos más importantes del diseño de la instalación física de la red FTTH. Con esta descripción se pretende garantizar un modelo de calidad para cualquier proyecto o planificación de red.

El objetivo de este sistema de diseño es encontrar la mejor solución para cada tipo de ambiente. Todos los diseños resultan tras la confluencia y estudio de varias alternativas realistas, pero sólo una debe ser la solución escogida. Es muy importante encontrar la solución óptima, que va a depender directamente de un buen conocimiento del área cartográfica a diseñar, así como de la propia experiencia en diseño de redes.

La solución final es función directa del tipo y características del área de estudio. Una solución óptima implica un bajo coste de implantación y mantenimiento, así como calidad en el funcionamiento, servicio fidedigno y diseño estético.

4.1.6.1. Áreas con viviendas multifamiliares o bloques de pisos

Las áreas con bloques de viviendas multifamiliares consisten generalmente en diversos propietarios (que serán abonados finales) distribuidos en varias plantas por bloque. Estas propiedades se encuentran agrupadas dentro de un área limitada, típicamente en un radio comprendido entre 100 y 1000 m, y con un número de viviendas que pueden variar entre 100 y 5000, dependiendo de la tipología.

Si no existe un nodo de acceso cercano, o bien no está accesible por otras dificultades, será necesario emplazar un nuevo nodo de acceso lo más centrado posible dentro del área de estudio. El área se encuentra limitada en extensión dependiendo del tipo de fibra escogida y del equipamiento activo de transmisión. Además existe también una limitación en el número de usuarios finales o abonados que van a poder conectarse al nodo de acceso [46].

Frecuentemente en estas áreas es interesante para las comunidades de vecinos dejar entrar la red urbana en la propiedad para conectarse directamente al nodo de acceso, lo que implica que no son necesarias cajas de empalme en un supuesto punto concentrador de fibra a instalar en el edificio. El nodo de acceso se conectará directamente al nodo principal de la comunidad a través de dos nodos de distribución (si es posible) o equipos de cross-conexión, tal y como se muestra en la siguiente figura.

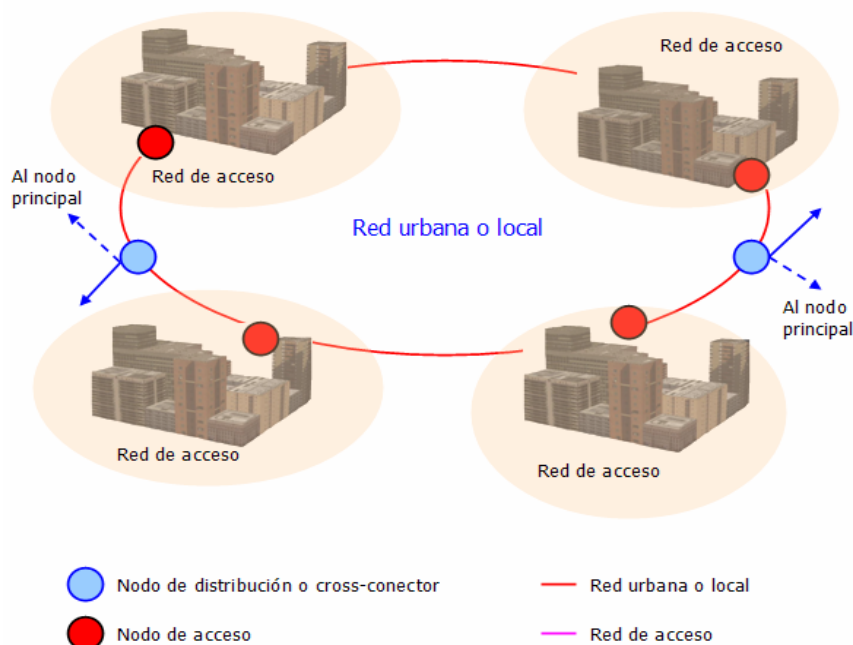


Figura 111: Red urbana de viviendas multifamiliares con redes de acceso

Por otra parte se recomienda instalar como red urbana principal, un cable óptico de 8 fibras como mínimo por cada nodo de acceso dentro de áreas con viviendas multifamiliares. A la hora de instalar fibras dentro de estas áreas, el número de puntos de empalme debe ser reducido lo máximo posible para reducir los costes de instalación, optimizar el espacio para los empalmes y obtener una red robusta. Los empalmes se ubican generalmente en cajas de empalme o concentradores de fibra, que suelen emplazarse en una sala ubicada en la planta baja o sótano del edificio, en España denominada R.I.T.I. (Recinto de instalación de telecomunicaciones interior) [46].

Las fibras que discurren por el interior de los edificios, se pueden instalar en cables tanto juntas como separadas. Estas fibras discurren desde cada vivienda hasta la caja de empalme o concentrador del R.I.T.I. a través de la canalización ICT. Esta canalización se divide en dos [46]:

- **Canalización principal.** Es la canalización vertical del edificio, y se define como la troncal de distribución. Nace en el R.I.T.I. y sube hasta la planta más alta del edificio. A lo largo de esta canalización, se suelen instalar registros por planta para la segregación de las fibras que irán a cada vivienda.
- **Canalización secundaria.** Es la canalización horizontal de cada planta del edificio. Nace en los registros de planta de la canalización horizontal y llegan hasta los registros de abonado, situados en la vivienda.

También es posible realizar los tendidos con fibras sueltas en el interior de microconductos (instalados o a instalar) en la canalización ICT del edificio. Para aquellos edificios que tengan pocas viviendas, se suele concentrar la conexión de fibra procedente de varios edificios en un único punto de acceso o concentrador.

Finalmente, las redes FTTH terminan con una fibra en punta por cada vivienda, generalmente alojada en el registro de abonado o de usuario. La llegada de fibras en áreas con pisos o comunidades de vecinos alcanza normalmente al 100% de las viviendas, aunque no demanden servicios a corto o medio plazo. Esta es una estrategia muy eficiente, particularmente para pisos con gran movilidad en cuanto a propietarios o arrendatarios se refiere.

La imagen de la figura 112 muestra la sección de un edificio de viviendas con red FTTH instalada [49].

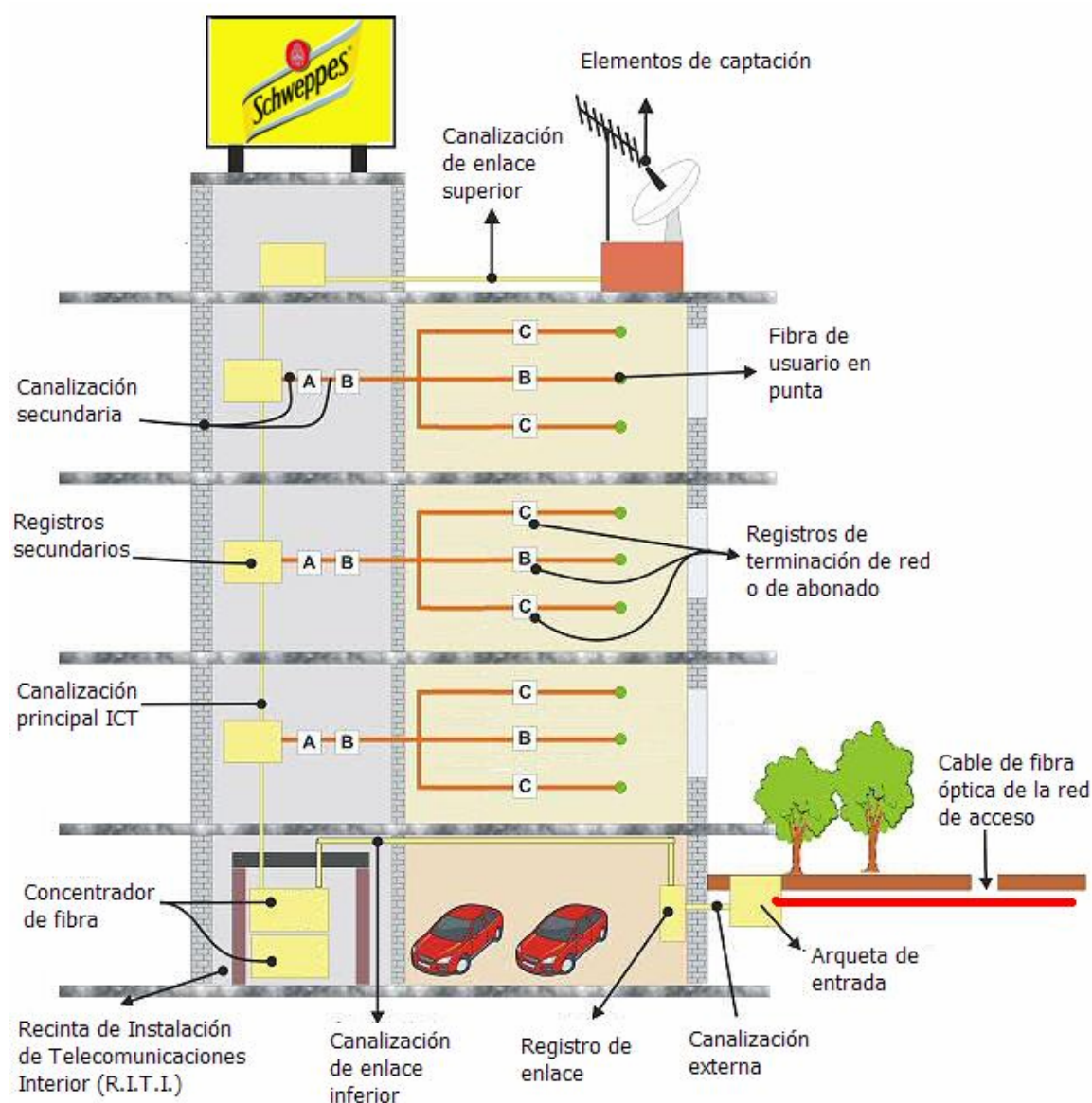


Figura 112: Sección de edificio con instalación FTTH sobre ICT

4.1.6.2. Áreas con viviendas unifamiliares o chalets

Las áreas con viviendas unifamiliares son territorios que engloban zonas de chalets o casas donde habita una única familia. Los nodos de acceso que dan servicio a las áreas con viviendas unifamiliares, suelen ubicarse en lugares apropiados para ello, que resulta ser el punto más cercano a todos ellos. En estos casos se debe establecer un enlace de conexión punto a punto con un par de fibra entre cada vivienda y el nodo de acceso. Este nodo además, se conectará al nodo central o principal a través de dos nodos de distribución de fibra (si es posible) o equipos de cross-conexión. El tamaño de la red de acceso se encuentra limitada por el despliegue técnico o de la proyección inicial, y el tamaño del nodo de acceso determina el número de usuarios que pueden conectarse al sistema [46]. A continuación se muestra una imagen de un área ejemplo de viviendas unifamiliares.

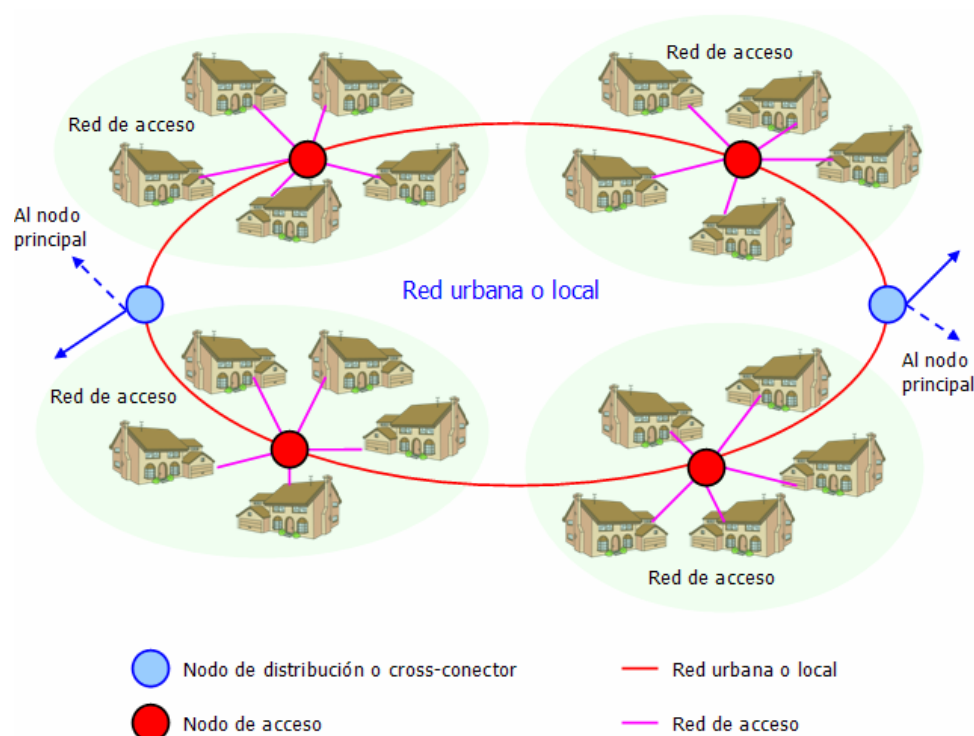


Figura 113: Red urbana con redes de acceso con viviendas unifamiliares

En ocasiones durante el primer despliegue de la fibra a lo largo de las zonas, no se conectan todas las viviendas a la red de acceso, para economizar coste, dado que el proceso de implantación de la red tiene un coste muy elevado, y el hecho de ser viviendas unifamiliares conlleva una fuerte inversión a la hora de instalar la fibra individualmente para cada casa. Sin embargo la red se debe diseñar para una futura conectorización de todas viviendas o ampliación. Esto implica [46]:

- Si se utiliza fibra soplada o desnuda únicamente para la red de acceso, se deberán instalar conductos y microconductos para albergar dicho cableado. Estos conductos deberán ser instalados con un recorrido tal que las viviendas que no vayan a ser conectadas en el primer despliegue, puedan ser

conectadas más delante a través de ramificaciones realizadas sobre el conducto central de la red. En este tipo de diseño no es necesario realizar empalmes de fibra, dado que son los conductos los que se unen o empalman y la fibra tan sólo discurre a través de ellos desde el nodo central hasta la vivienda.

- Los conductos a instalar desde el nodo de acceso a las viviendas, deberán pasar a lo largo de las nuevas viviendas en construcción para una posible futura conexión más adelante.
- Si se utiliza cable de fibra para llegar a las viviendas unifamiliares y no se utiliza el excedente de fibra en el tendido para llegar a todas las viviendas, es necesario instalar tubos vacíos con buenos empalmes para instalar cable más adelante sin necesidad de realizar calas o excavaciones en la acera o calzada.

4.1.6.3. Áreas de escasa población

En el caso de áreas que cuenten con escasa población, tales como los medios rurales, los despliegues de fibra tan sólo se deben realizar cuando las redes de conexión municipales o regionales han sido construidas. Para que este despliegue sea económicamente viable, se deben planificar distintos puntos de conexión para los conductos y cables desde el inicio de la red, sin necesidad de instalar un cable por vivienda hasta el nodo de acceso.

En cuanto a las previsiones futuras de conexión, se deben preparar los cables a modo de balonas o cocas en el interior de la tierra o, lo que es más común, en arquetas de comunicaciones ubicadas en aceras o calzadas.

La conexión de cada propiedad en este tipo de áreas se debe ajustar a las siguientes premisas [46]:

- La geografía. El nodo de acceso se debe implantar en un pueblo o similar a través del cuál pase la red de conexión municipal o regional sobre la que se sustenta el servicio.
- La distancia al nodo de acceso. En este tipo de áreas se deben de utilizar siempre fibras monomodo, que son las que soportan distancias superiores a 1 km con un mínimo de calidad.

Posee un gran interés económico tener tantos usuarios como sea posible dentro de un mismo nodo de acceso o nodo municipal. Este hecho permitirá reducir los costes por usuario final a la hora de la instalación y mantenimiento.

A continuación se muestra en la figura 114 un ejemplo de una red de escasa población que engloba diversas agrupaciones de habitantes espacialmente repartidos.

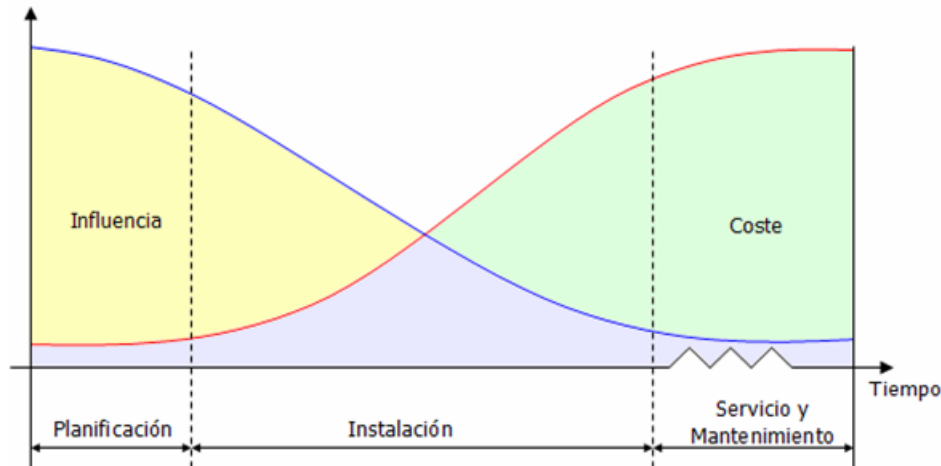


Figura 115: *Curvas de influencia y coste en un proyecto FTTH*

Es recomendable realizar la planificación de una red de fibra óptica tan extensa como para dar servicio a tantos usuarios finales como sea posible desde el menor número de nodos de acceso. El tamaño del nodo de acceso viene determinado por las condiciones locales para la red de cable, tales como tipo de construcciones, distancias entre viviendas, propiedades, acuerdos entre propietarios, derechos de instalación, etc. Cada proyecto es único y requiere su propia planificación.

A continuación se detallarán todos los aspectos que intervienen en la planificación de una red FTTH a nivel técnico, social y económico que intervienen en el proyecto.

4.1.7.1. Circunstancias propietarias

Cuando se va a llevar a cabo la instalación de cualquier red de banda ancha, en este caso FTTH, es frecuente que los propietarios finales a los que se les va a dar servicio quieran los derechos de propiedad de la red pasiva que distribuye los servicios. Esto se debe a que la instalación de una red de banda ancha puede incrementar el valor de la propiedad. Adicionalmente los operadores de servicios pagan ciertas tasas, honorarios o rentas por la utilización de dicha red.

Este hecho hace que exista por parte de los propietarios cierta ambición en construir nuevas redes para incrementar la competencia entre diferentes operadores de cable que puedan prestar servicio. Sin embargo, el propietario posee en estos casos la responsabilidad del mantenimiento total de la red pasiva, por lo que supone una barrera para los pequeños propietarios. De ahí que a lo largo de los dos últimos años hayan aparecido los operadores neutros, encargados de la instalación y el mantenimiento de la red, y cuya explotación de la misma la alquilan a los operadores que ofrecen los servicios al usuario final. Es el caso de las empresas eléctricas, empresas de transporte, etc.

Además, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos [46].

- Tal y como se ha mencionado anteriormente, la red de acceso está constituida tanto por la red de un propietario único, como por la red entre propietarios con destino al nodo de acceso.
- La red de acceso puede pertenecer en derecho a varios propietarios encargados de su instalación, mantenimiento y explotación, o incluso puede pertenecer a otros propietarios, operadores, organismos y empresas que pueden alquilarla.
- La red de acceso suele instalarse en túneles, conductos o galerías bajo tierra para evitar innecesariamente excavaciones o calas, y pasando a través de otras propiedades que ayudan a su distribución.
- Los acuerdos sobre el derecho de uso y disposición del terreno se deben de negociar antes de comenzar el proyecto. Estos derechos deben ser firmados ante registradores o notarios para encuadrarlo dentro del marco legal.
- En ciertas comunidades con redes locales o urbanas, es posible arrendar o alquilar conexiones de fibra oscura punto a punto, como por ejemplo ocurre con algunas empresas en nuestro país: Telefónica, Unión Fenosa, etc.
- Es necesario que exista un lugar y espacio apropiado para la ubicación del nodo de acceso. En muchas ocasiones el propietario de la red debe suministrar y preparar dicha ubicación, para luego podérselo alquilar a los operadores. El espacio deber contar con el espacio suficiente como para albergar todo el equipamiento activo característico de cada operador.

4.1.7.2. Viviendas y propiedades

Para poder realizar un proyecto de red FTTH, es necesario contar con una actitud positiva para realizar la instalación por parte de los residentes y los propietarios. Es cierto que el acceso a una red de banda ancha incrementa el valor de la propiedad y permite que las viviendas sean más atractivas en el mercado.

Es muy importante que exista cooperación entre las diferentes organizaciones, propietarios y arrendatarios, para poder crear las mejores condiciones y acuerdos en este tipo de proyectos. Si no se dan estas condiciones, es muy probable que el proyecto no salga adelante, puesto que la discrepancia entre los participantes supone la paralización del mismo.

4.1.7.3. Aspectos legales

Para poder facilitar la proyección de una red FTTH se deben firmar acuerdos legales activos antes de comenzar el proyecto. Sin embargo existen muchas propiedades complicadas que pueden transformar acuerdos sencillos en complicados, incluso difíciles de realizar.

Cualquier acuerdo deberá beneficiar mutuamente a las partes implicadas de un modo razonable. Existe un gran número de modelos diferentes de acuerdos, pero el más destacado es el que consiste en ceder el derecho de uso de la propiedad, a cambio de servicios gratuitos, descuentos en el acceso a la red de servicio o simplemente dinero. También es conveniente establecer acuerdos con aquellas propiedades privadas que se ven afectadas por el paso de la red a través de su interior [46].

Un buen acuerdo que contempla el tránsito de cables a través de cualquier propiedad, debería cubrir al menos los próximos 25 años a contar a partir de la instalación de la red, y además debería de continuar vigente aunque la propiedad se vendiese. Por el contrario, aquellos actores que cuenten previamente con el derecho de instalación de líneas en ciertos emplazamientos, cuentan con la ventaja de no necesitar permisos previos ni acuerdos para llevar a cabo el proyecto.

4.1.7.4. Investigación de la disponibilidad

Es muy importante realizar una investigación acerca de la disponibilidad de los conductos y cables dentro de una misma propiedad y entre propiedades. Las diferentes vías y caminos de instalación de cables, fibras y empalmes deberán ser considerados y ajustados como parte de la solución de la red. A tener en cuenta [46]:

- Se deben considerar las exigencias y requerimientos para la protección contra incendios.
- Chequear todas las soluciones posibles para la instalación, tales como co-instalación del cable con otros sistemas que requieran realización de calas, zanjas y excavaciones, como tubos de calefacción urbana, electricidad de baja tensión, etc, que permiten ahorro de costes.
- Considerar los tipos de conductos y longitudes convenientes en cada caso, ya sean existentes o a instalar.

4.1.7.5. Planificación detallada

A partir de la información recibida de la planificación básica general, se debe de realizar una planificación detallada de la instalación. Este proceso incluye principalmente los siguientes pasos a seguir:

- Preparar detalladamente la delineación o planos con la infraestructura, recorrido del cable, tipos de microconductos y terminaciones de red.
- Listado de materiales con los costes específicos y totales.
- Estimación global de los costes de la ingeniería, materiales e instalación.

- Condiciones del suministro de materiales.
- Cronograma del proyecto, con tiempos estimados.
- Métodos de instalación, canalizaciones y excavaciones para las diferentes partes de la red.

4.2. Instalación de una red FTTH

Una vez realizado el diseño general a modo de proyecto, con memoria, planos, y anexos vinculantes con la información detallada, se debe trasladar dicha información a la práctica, y por lo tanto a la instalación en campo.

Es necesario tener en cuenta que un proyecto de implantación de red consta de 3 fases claramente diferenciadas: proyecto de despliegue e implantación, instalación de red, y *As Built* final de instalación, en el que se recoge el estado final de la red y las posibles variaciones acaecidas durante el proceso de instalación no reflejadas en el proyecto inicial. En ocasiones no es necesario presentar un nuevo proyecto, y basta con adjuntar anexos al proyecto inicial en caso que fuera necesario.

A lo largo del siguiente punto se describen todos los aspectos a tener en cuenta a la hora de realizar una instalación en campo de una red FTTH previamente proyectada.

4.2.1. Recomendaciones generales de instalación

Antes de iniciar la instalación, es necesario tomar en cuenta una serie de recomendaciones generales que van a implicar una mayor eficiencia del proceso, reducción de tiempo y costes, y reaprovechamiento de los recursos existentes o por instalar. Los más importantes son los que se recogen a continuación.

4.2.1.1. Perforaciones

Antes de comenzar la instalación, es necesario chequear si la planificación es certera y exacta, y corresponde con la realidad. Algunas actividades perturban el curso normal de la jornada de trabajo, tales como las perforaciones. Cualquier perforación se debe llevar a cabo con filtros de polvo, y con las herramientas y métodos apropiados para el material a ser perforado.

4.2.1.2. Protección de zonas visibles

Los accesorios como tubos, canaleta, bandejas, rejibands, etc. que protegen y esconden cables y microconductos deberán ser instalados en general en áreas sensiblemente visibles como escaleras, sótanos y garajes antes de que comience la instalación. Es importante escoger el tipo de accesorio para cada caso, que encaje correctamente en el ambiente, que sea lo menos visible y al mismo tiempo que ofrezca una buena protección [46].

4.2.1.3. Huecos de ascensores

La instalación de microconductos y cables en el hueco de un ascensor es frecuentemente una buena solución para evitar perforaciones y calos. Tan sólo se podrá trabajar en los huecos de ascensor con la presencia de un instalador de ascensores certificado.

Los constructores de los edificios, pueden expedir permisos especiales que capacitan a los instaladores de cable para realizar acometidas de cable en el interior de los huecos de ascensor. De hecho el propio constructor es la persona encargada de autorizar o desautorizar los trabajos en el edificio. Por otra parte, el propietario del elevador es responsable de que se cumplan los requerimientos de protección de seguridad y salud [46].

4.2.1.4. Información a los residentes

Los residentes deben estar informados con bastante tiempo de antelación antes de que la instalación comience, particularmente si se ven afectados o desconectados servicios básicos del edificio o vivienda, tales como potencia eléctrica, teléfonos o ascensores. Si fuera necesario mover mobiliario de las viviendas, siempre será responsabilidad del residente, y el instalador deberá realizar una limpieza de la zona afectada tras el trabajo.

4.2.1.5. Seguros y compensaciones por daños y perjuicios

Es muy importante tener personal técnico de instalación competente con protección de seguros. Además, el ingeniero de instalación deberá compensar por él mismo con todos los daños y perjuicios ocasionados, si los hubiera, sin incluir la pintura [46].

4.2.1.6. Certificación

La gran mayoría de los proveedores, requieren que el ingeniero de instalación esté certificado para poder ofrecer al cliente final un sistema con garantía de calidad.

4.2.2. Instalación de áreas con nodo

La instalación de una red FTTH se particulariza a la hora de instalar un área dedicada al emplazamiento de un nodo de acceso o cualquier otro nodo inferior o superior. En este caso, es necesario seguir una serie de recomendaciones generales que no se deben pasar por alto, dada la importancia de esta ubicación. Hay que tener en cuenta que en las áreas nodo se instalará todo el equipamiento activo de la red, que permitirá ofertar los servicios al usuario final, y por tanto, capacita el funcionamiento de la red. Las principales recomendaciones se recogen a continuación.

4.2.2.1. Nodo de acceso

El nodo de acceso es una ubicación centralizada preparada para albergar los switches, routers, ordenadores, servidores y equipamiento de telefonía para dar servicio a un grupo determinado de viviendas. El diseño depende directamente del tipo de equipamiento y de su cuota de uso. Para los edificios de nueva construcción es deseable tener una lista bastante extensa, mientras que para edificios existentes es necesario ajustarse a las condiciones determinadas por el área en cuestión.

El emplazamiento geográfico del nodo deberá ser optimizado para que las distancias hasta los usuarios finales sean lo más cortas posible. Además, el emplazamiento deberá contar con buena accesibilidad para la red urbana o local.

El espacio donde esté ubicado el nodo de acceso deberá estar climatizado y ventilado, deberá contar con puertas de seguridad antipánico y preferiblemente sobre el nivel de la tierra. Por otra parte, es necesario que tenga muy buena protección contra desperfectos ocasionados por el agua, con desagües en el suelo y alarmas de seguridad [46].

4.2.2.2. Áreas para armarios de empalme y/o puntos de concentración de fibra

Los armarios o cabinas para empalmes y los puntos de concentración de fibra deberían ser lo más discretos posible, pero a la vez deben de ser de fácil acceso para tareas de servicio y mantenimiento. Las ubicaciones más apropiadas para albergar este tipo de armarios son las centrales de televisión por cable o de energía, sótanos, garajes o similares. Se deben de evitar las zonas húmedas y los lugares expuestos a posibles inundaciones.

4.2.2.3. Nodo de abonado o usuario final

Todas las redes FTTH finalizan hacia el lado del usuario en una fibra en punta o desnuda lo más cercana a la puerta de entrada a la vivienda y a poder ser, cerca de un enchufe de corriente. Un lugar apropiado para la instalación de los nodos de usuario es el recibidor de la vivienda o cualquier otro punto central, como el interior de un armario de ropa, e intentando dejar siempre espacio suficiente para futuras ampliaciones de equipamiento (de ahí la necesidad de la proximidad de las tomas de corriente) [46].

4.2.3. Instalación de conductos y acometida de cables en medio terrestre

Los conductos dedicados a la instalación de cable bajo tierra y de otros tipos de instalación, se suelen planificar para ser usados durante el mayor número de años posible, lo que implica requerimientos especiales tanto en los materiales como en la instalación. Los materiales que se emplean para la fabricación de conductos deben de cumplir como mínimo con los requisitos que se enumeran a continuación [46].

- El conducto debe de soportar la presión de la tierra.
- El conducto debe estar diseñado para realizar una instalación correcta y sobre todo para sustituir en un futuro unidades de fibra lo más sencillamente posible, pero su finalidad no es la de tubo de protección de cable, dado que existe riesgo de fricción y compresión de la fibra.
- No se pueden utilizar conductos de color amarillo, dado que pueden ser confundidos con tubos de potencia.
- El conducto y los accesorios anejos al mismo deben de ser capaces de soportar la presión de aire requerida para la instalación de unidades de fibra o cables.
- Los conductos de sobra y con cable deben de acabar en los extremos.

Cuando se realizan instalaciones de cable de fibra con bastantes fibras en su interior, es necesario dejar la instalación preparada para realizar futuros empalmes en el propio subsuelo o tierra sin necesidad de extraer el cable. Para ello, es necesario planificar antes de la instalación del cable, distintos puntos a lo largo de su recorrido. Estos puntos se suelen situar en arquetas o cajas donde el cable se recoge y almacena en balonas o cocas enrolladas, que permitirán en un futuro realizar empalmes o distribución de la fibra. Estos cables deben de soportar una temperatura de instalación entre los -15 °C y los +40 °C [46].

En cuanto a la profundidad de la instalación existen normativas reguladas por los ayuntamientos locales que determinan estos aspectos, aunque por regla general, se debe cumplir con los siguientes requisitos [46]:

- Los conductos a instalar en áreas verdes y pavimentos deben de situarse al menos a 0.35 metros de profundidad.
- Los conductos a instalar en áreas de carreteras o asfalto deben de tener al menos una profundidad de 0.55 metros.

La solicitud de permisos a la autoridad competente para la realización de los trabajos de instalación de conductos y cables, debe de realizarse con suficiente antelación dado que la duración de los trabajos suele ser de varios días. En función del tipo y características del terreno, será necesario aplicar diferentes métodos de instalación, como por ejemplo zanja para cable, enterrado de cable, etc.

Las dimensiones de cada conducto se escogen en función de las dimensiones y número de cables a instalar en su interior. El diámetro del interior del conducto suele ser del orden de entre 30 y 40 mm, aunque existe una regla general que establece que el diámetro del conducto debe de ser al menos 1.5 veces el diámetro del cable, y el material de fabricación más común es el polietileno de alta densidad o HDPE [46].

En aquellos casos en los que ya exista instalado un conducto y pueda ser utilizado para el tendido de cable, será necesario equipar con subconductos paralelos a éste para permitir la instalación de más cables en el futuro.

Cuando se ha finalizado y decidido el mapeado de todos los cables y conductos de la red y se han cerrado todos los acuerdos sobre derechos de utilización del terreno, comienzan los trabajos de instalación detallados en la planificación. Para ello, es necesario trazar un mapa completo sobre el terreno antes de comenzar cualquier trabajo. Hay que estudiar previamente los puentes, alcantarillas, cables de potencia y electricidad enterrados, tuberías de gas, agua y tantos otros cables como se indiquen en los mapas del proyecto, particularmente en aquellas zonas donde el cable óptico cruza a través de ellos.

Es muy importante decidir, marcar y señalar cualquier punto importante sobre el terreno, como ubicación de arquetas, cajas de empalme, armarios de concentración de fibra, etc. Antes de comenzar con las zanjas y excavaciones, es necesario tomar muestras del terreno que proporcionen la información necesaria sobre el equipamiento a utilizar. Así por ejemplo se pueden tomar decisiones sobre si es necesario realizar explosiones sobre el terreno, o utilizar protecciones de refuerzo sobre el cable. Además, las muestras también se utilizan para el trabajo posterior y para rellenar la ruta del cable instalado [46].

Tal y como se comenta anteriormente, es necesario marcar sobre el terreno aquellas zonas destinadas a la segregación o empalme de fibras. Cuando el cable se encuentra ordenado, es muy importante dejar largas longitudes de fibra enrolladas en balonas en puntos de empalme o arquetas accesibles desde la superficie. El radio de curvatura del cable, debe ser siempre 15 veces superior al radio del cable, de acuerdo con las especificaciones de los fabricantes. Enrollar el cable con menos radio del recomendado puede crear problemas de atenuación en la fibra u otros problemas asociados [46].

Por último, estas arquetas deben de tener la accesibilidad suficiente como para poder realizar reparación de cables o de conductos de guía sin necesidad de extraer la fibra a la superficie.

A continuación, se detallan los métodos de instalación más comunes en función del área de instalación, terreno, acceso a las viviendas, etc.

4.2.3.1. Instalación de conductos y cables mediante enterrado

Enterrar directamente los conductos o cables en la tierra es la solución técnica más rápida y económica para enlaces de larga distancia. En ciertas áreas con páramo, zanjas, cunetas o con muchas piedras, es necesario cavar para enterrar el conducto. Durante la instalación es necesario prestar especial atención a los siguientes hechos [46]:

- Realizar una pre-excavación para estudiar el terreno.
- Evitar cualquier obstáculo.
- Transportar el volumen requerido de conductos.
- La instalación del cable se debe realizar de forma cuidadosa, sin movimientos bruscos.
- La excavación debe de mantenerse linealmente a la misma profundidad y de forma correcta.
- Las excavaciones deben de ser lo más lineales posibles, evitando colocar los conductos de lado o costado.
- Mantener siempre el radio mínimo de curvatura recomendado.
- No aplicar tensiones ni sobreesfuerzos sobre los cables o conductos.

A continuación se muestra una imagen en la figura 116 sobre cómo debe de realizarse el enterrado de conductos para transporte de cableado de red [46].

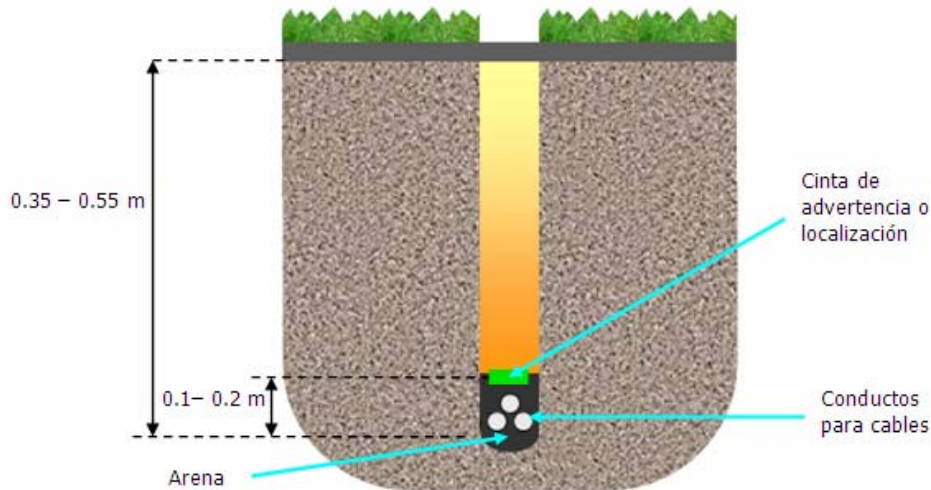


Figura 116: Preparación de los conductos mediante enterrado

La excavación para enterrar los conductos, puede ir subiendo y bajando gradualmente a lo largo del camino para evitar curvas agudas y cambios abruptos, y aunque intentado conservar la mayor linealidad posible [46].

La canalización basada en enterramiento puede ser eliminada, excavando y desenterrando previamente los conductos y cables; y puede ser invertida, para lo que necesariamente se debe destapar los conductos y cables igualmente. La experiencia demuestra que la mayoría de los daños ocurridos en cables y conductos se deben a que no son destapados.

Los conductos deben ser destapados e inspeccionados para observar si poseen daños si se han producido abruptos cambios de nivel o vueltas agudas durante la instalación. También se realizarán inspecciones si el enterramiento se ha visto afectado por tensiones externas, como por ejemplo la existencia de piedras grandes en el terreno capaces de modificar la dirección de la canalización [46].

El procedimiento de enterrar cables es muy rápido. Pueden instalarse más de 6 km de conductos en tan sólo dos días de trabajo, uno dedicado a la pre-excavación y otro dedicado al enterramiento en sí de los conductos con la arena, pudiéndose instalar además varios conductos simultáneamente.

Es muy recomendable instalar conductos y cables sobre terrenos inestables, puesto que facilitan el trabajo a la hora de excavar, desenterrar y enterrar que los terrenos más estáticos y estables.

4.2.3.2. Instalación de conductos y cables mediante excavado y perforación

En las ciudades, donde generalmente ya existen instaladas diversas canalizaciones con tubos y cables, no es recomendable el método de enterramiento descrito anteriormente, sino que en estas áreas es preferible realizar excavaciones o perforaciones, o lo que es lo mismo, la realización de zanjas.

Por regla general la parte inferior de las zanjas se rellenan con al menos 5 cm de arena para allanar la base y evitar los desniveles sobre el que irán instalados los conductos y cables. A continuación, se instalan los conductos, que deben ir cubiertos con una capa de arena fina de espesor comprendido entre 5 y 10 cm. La anchura de las zanjas puede variar en función de la cantidad de tubos y cables que se quieran instalar. Las zanjas más anchas pueden llegar a tener capacidad para albergar hasta 10 conductos, mientras que las más estrechas tan sólo podrán albergar uno o dos [46].

Existe además una nueva técnica denominada microzanjeado, que consiste en realizar una zanja a lo largo del asfalto a poca profundidad. Este método se utiliza para realizar el menor daño posible en aquellos casos que son críticos, y supone un compromiso entre el daño y los costes por un lado, y la seguridad de instalación de la fibra por otro.

En cuanto a los conductos instalados en áreas de sembrado o cultivadas deben de ubicarse los suficientemente profundos como para que el cultivo no ponga en peligro la instalación óptica.

A continuación se muestra una imagen en la figura 117 sobre cómo debe de realizarse la excavación y zanjado para la instalación de conductos [46].

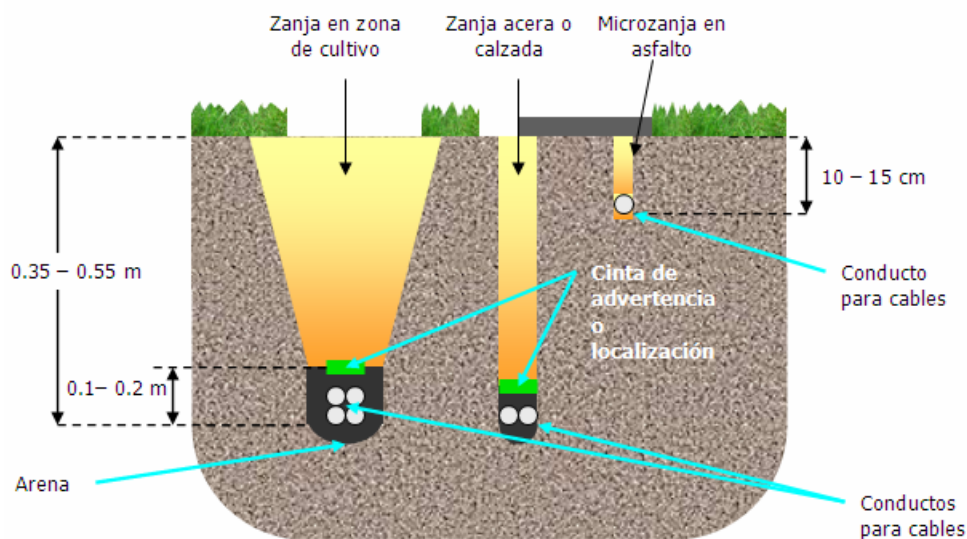


Figura 117: *Instalación de conductos por excavación y perforación*

4.2.3.3. Cinta de advertencia

Es obligatorio colocar una cinta de advertencia o localización con texto explícito, que puede ser de plástico o aluminio. Generalmente se suele colocar entre 10 y 20 cm por encima del conducto, y su finalidad es evitar rupturas cuando se realicen excavaciones en el terreno. Si se utiliza etiquetado de plástico, es más fácil de localizar y rastrear el conducto que si se señala con cintas metálicas [46].

4.2.3.4. Instalación de conductos

Aunque cada día se investiga sobre nuevos métodos de instalación de conductos y microconductos, es importante describir las principales técnicas estándar de instalación, dado que son las más utilizadas a día de hoy.

Durante la instalación en el interior de emplazamientos, comunidades o ciudades, es muy práctica la utilización de conductos existentes de larga longitud, como puede ser el caso de galerías, túneles u otras canalizaciones. Para poder aprovechar los recursos existentes, es necesario realizar una planificación exacta y concreta antes de la instalación del cable. Las direcciones y ubicaciones concretas y detalladas se realizarán en campo, bajo inspección visual, a lo largo de toda la ruta proyectada.

Las instrucciones de instalación elaboradas durante el proyecto deben incluir información sobre el número de perforaciones o agujeros que se necesitan realizar, presentar escalas del cable con su recorrido correspondiente, limpieza y reparación de conductos, y en general cualquier dato importante sobre trabajos a realizar a lo largo de la ruta de trazado del cable [46].

Para minimizar el riesgo de daños que puedan sufrir los cables y conductos durante la instalación, es necesario revisar exhaustivamente el sistema de conductos instalados, los cables circulantes en su interior y el conducto a instalar. Por regla general deberán colocarse los nuevos cables, microconductos y fibras en el interior de un conducto propio (también de nueva instalación), aunque si esto no fuera posible también se permite colocarlos junto a otros cables ópticos o de potencia instalados, sin degradar su funcionamiento [46].

Si no fuera posible instalar un nuevo conducto apropiado para albergar el cable, bien por falta de presupuesto o bien por falta de espacio, es posible instalar subconductos más pequeños de PVC o PE, capaces de aumentar la capacidad del conducto. Los sistemas basados en subconductos admiten más fácilmente las futuras ampliaciones y expansiones, y además no se ven influidos los cables ya instalados actualmente.

4.2.3.5. Técnicas de instalación de cables en el interior de los conductos

Existen diferentes métodos y técnicas de instalación de cables en el interior de conductos, y son las que se enumeran a continuación [46]:

- Instalación tradicional con guía, en las que se utiliza un cable o cuerda a modo engarzado al cable de fibra para poder tirar de él a lo largo del conducto. Implica aplicar una importante tensión al cable, por lo que ha de realizarse con mucho cuidado.
- Instalación por soplado mediante aire comprimido, en las que se introduce el cable por compresión en el conducto. Es necesario que el conducto no tenga

agujeros o vías de escape de aire, puesto que la comprensión no tendría efecto.

- Instalación flotante con agua. Este método es similar al anterior, pero introduciendo el cable dentro de agua para que pueda ser deslizado hasta el final del conducto flotando en agua.

Estas técnicas se utilizan para la instalación de cables en cualquier tipo de red, salvo en la red de acceso, donde su aplicación es poco frecuente. Sin embargo, es muy importante realizar la instalación de forma correcta independientemente del método utilizado. Esto implica evitar, dentro de lo posible, las curvaturas y torsiones del cable, los empalmes con esquinas cerradas, etc.

Las distancias máximas de instalación a través de cualquiera de estas técnicas dependerán de cómo se haya realizado la instalación de los conductos. Así por ejemplo, si los conductos poseen suciedad, demasiadas curvas y bordes agudos reducirán la distancia de instalación. En general, las técnicas de soplado y flotado permiten alcanzar distancias de entre 2 y 6 km, lo cual permite ahorrar tiempo en la instalación.

4.2.4. Instalación de microconductos y tendido de cables en medio aéreo

La instalación de microconductos y cables ópticos aéreos posee una serie de beneficios respecto a la instalación terrestre: implican menor coste de instalación, versatilidad y facilidad de instalación, menor retardo dado que no es necesario solicitar licencias de obra a las administraciones públicas o entidades privadas y propietarios. Por el contrario, la instalación aérea de cables supone un mayor impacto visual, y una mayor exposición del cable a agentes externos que pueden causar el deterioro del mismo con el paso del tiempo.

La utilización de tendido aéreo es bastante habitual en enlaces de larga distancia, en los que la instalación bajo tierra del cable supone una fuerte inversión económica. Es muy común utilizar los apoyos aéreos de las líneas de alta tensión para el tendido de cables, puesto que el ahorro de costes en infraestructura se reduce sensiblemente. Por lo tanto, se suele utilizar para instalaciones FTTH de áreas con poca densidad de población. Sin embargo, esta técnica es prácticamente inexistente en redes locales o urbanas y en redes de acceso, donde los tendidos aéreos tienden a desaparecer en detrimento de las instalaciones subterráneas.

4.2.4.1. Técnicas de instalación de cables en el interior de los conductos

Existen diferentes métodos y técnicas de instalación de cables en el interior de conductos, y son las que se enumeran a continuación [46]:

- Un primer método, basado en la utilización del cable autosoportado, un tipo de cable que se fabrica de tal forma que las fuerzas axiales no influyen en las propiedades de la fibra.
- Un segundo método es utilizar un cable existente envolviendo el cable óptico alrededor de él de forma que quede amarrado o que exista una pequeña separación entre el cable existente y el nuevo cable óptico a instalar.
- Un tercer método, que consiste en integrar el cable óptico dentro de un cable de potencia (eléctrico). En este caso, lo más ventajoso es integrar el cable óptico dentro del cable de tierra, el cuál posee potencial cero, simplificando la instalación y la terminación.

4.2.5. Instalación tradicional de interior de redes FTTH (planta interna)

Cualquier tipo de vivienda en general, y más concretamente los pisos, poseen gran cantidad de cables instalados en su estructura, tales como cables de potencia y energía, telefonía, televisión y datos. Estos cables se instalan a lo largo de bandejas y conductos que llegan hasta cada planta del edificio (ICT). Sin embargo es bastante complicado que los cables ópticos se mantengan en posición vertical a lo largo de los conductos de ICT del edificio, por lo que se suelen instalar en huecos especiales que permiten esta posición, o bien se utilizan cables especiales que permiten la instalación vertical y que técnicamente se denominan cables *riser*.

Es muy importante proteger los cables ópticos de los cables de cobre muy pesados en conductos y bandejas, dado que pueden someter a los cables ópticos a una elevada presión y la fibra puede verse afectada, perdiendo parte de la señal transmitida. Si el cable óptico se instala bajo un cable de cobre, puede protegerse con un tubo especial. Un cable óptico siempre debe ser instalado de tal forma que no sufra daños mecánicos, bien producido por la propia instalación, como las especificaciones mínimas de radio de curvatura; o bien producido por cualquier agente externo que pueda dañar la estructura del cable una vez instalado, como por ejemplo el paso de automóviles, carretillas, sillas, mesas, etc.

Los cables ópticos introducidos en huecos *riser* se encuentran expuestos a fuerzas longitudinales debido a su propio peso, que puede llegar a ser considerable en edificios de gran altura. Por lo tanto, es necesario en estos casos amarrar o anclar el cable por cada metro de tendido con bridas, correas o cualquier otro elemento de sujeción, y además lo suficientemente holgado como para no dañar el cable y crear pérdidas de señal en la fibra [46].

De ahí que se utilicen los denominados cables *riser*, cuya principal características es su bajo peso y su flexibilidad, que permiten tender el cable de manera vertical sin necesidad instalar tantos elementos de sujeción, y a su vez permite transportar el cable por vías menos rectilíneas que no podría soportar un cable más rígido.

4.2.6. Los empalmes en planta interna

Inmediatamente después de haberse tendido el cable, es necesario realizar todos los empalmes requeridos a lo largo de toda su longitud. La técnica de empalme elegida puede variar en función del tipo de cable y de los requerimientos de transmisión. Así por ejemplo, para tramos de cable relativamente cortos sin especiales requerimientos de atenuación o alta capacidad, se pueden utilizar empalmes mecánicos y/o conectores de empalmes. Sin embargo, cuando se dimensiona la red para obtener capacidades elevadas (del orden de giga bits) o distancias muy largas mediante fibra óptica monomodo, se precisa utilizar técnicas de empalme que introduzcan baja atenuación. La técnica más frecuente en estos casos es el empalme por fusión de fibra.

Un empalme por fusión de fibra puede introducir una atenuación entre 0.1 y 0.5 dB de acuerdo con la recomendación ITU-CCITT, aunque lo más normal es que introduzca unas pérdidas medias de 0.2 dB. Por el contrario, un empalme mecánico introduce unas pérdidas entre 0.3 y 0.4 dB. Además, a lo largo de los años se reseca el aceite de los empalmes de la fibra, incrementando las pérdidas en hasta 1 dB [6].

Los empalmes se pueden realizar bajo la superficie terrestre utilizando vehículos especiales, carpas o tiendas de campaña. También pueden realizarse en alcantarillas, galerías o huecos subterráneos. Es especialmente importante que el ambiente esté limpio y en buenas condiciones de humedad y temperatura, entre +10 °C y +30 °C para evitar tensiones fijas en la fibra. Si durante el trabajo se utiliza algún tipo de aparato de ventilación, es necesario filtrar el aire para evitar que las pequeñas partículas contaminen los empalmes [39].

Sin embargo, la mejor opción es utilizar un vehículo especial de fusión, puesto que posee muchas ventajas:

- Se reduce el tiempo total empleado para los empalmes.
- Las herramientas y materiales están siempre a mano.
- Los empalmes se realizan en ambientes controlados, que contribuyen a mejorar la calidad del empalme.
- El exceso de cable puede ser almacenado en alcantarillas, arquetas o huecos protegidos.

Por último, los empalmes de cables aéreos se realizan siempre a nivel de la tierra, y por tanto sobre la superficie. Si no fuera posible realizar los empalmes de esta forma, sería necesario utilizar elevadores o algún elemento similar para empalmar el cable en altura.

4.2.7. Cajas de empalme

Las cajas de empalme tanto para planta interna como para planta externa, deben de cumplir los siguientes requisitos a la hora de la instalación [39]:

- Facilidad de manejo e instalación
- Facilidad de apertura y sellado nuevamente sin necesidad de utilizar gran cantidad de materiales para ello.
- Ofrecer buena protección mecánica de la fibra bajo condiciones extremas.
- Ofrecer la misma protección para cables extra-reforzados y no reforzados.
- Ofrecer la misma protección para diferentes diámetros de cable.
- Ofrecer la misma protección tanto para cables enterrados como aéreos.

Las cajas de empalme pueden instalarse tanto para ambientes internos como externos, y deben de ser totalmente herméticas (estancas), capaces de soportar inundaciones. Un requerimiento estándar de las cajas de empalme es soportar la presión del agua correspondiente a 6 metros de profundidad durante un cierto período de tiempo. Por ello, estas cajas requieren ser cuidadoso y preciso a la hora de instalarlas.

4.2.8. Entrega de la instalación finalizada

Cuando se finaliza la instalación y se entregan las mediciones de pérdidas del sistema al cliente, es necesario realizar y firmar una certificación final de la instalación. Para ello se debe de realizar una última inspección visual, en la que se deben reparar aquellos errores cometidos durante la instalación, garantizando una garantía de calidad del sistema.

Capítulo 5

Diseño e Instalación de una red FTTH

El presente capítulo tiene como finalidad aplicar todos los métodos de diseño e instalación de un sistema FTTH detallados en capítulos anteriores, aplicado a un caso real. Será necesario contar con todos los elementos propios de un sistema de fibra óptica para que, aplicando las recomendaciones y procedimientos de planificación y diseño de una red FTTH, se pueda realizar una instalación del sistema en campo con resultados reales.

Para ello, se propone un modelo de operador neutro válido para alquilar a cualquier operador de cable sin necesidad de que éstos inviertan en la infraestructura física. Dado el volumen de trabajo y especificación que implica el diseño de la red completa, y puesto que el diseño de la parte activa de la red depende en gran medida de los equipos de transmisión, se pretende realizar un diseño exclusivo de red PON, y por tanto un diseño de la parte pasiva de la red FTTH.

5.1. Objeto y alcance del proyecto

Se plantea un modelo de operador neutro de infraestructura óptica pasiva, que pone su red de fibra óptica a disposición de los diferentes operadores de cables existentes en el mercado. Este modelo consiste en desplegar una red FTTH desde una central de telecomunicaciones hasta una zona residencial de viviendas multifamiliares.

La solución final consistirá en un proyecto llave en mano constituido por el diseño técnico y planificación de la red, así como por el proceso de instalación final que permita la comprobación final de los resultados obtenidos.

El proyecto contemplará la siguiente información:

- Diseño y planificación de la arquitectura de red escogida para el despliegue de la red FTTH a partir de redes GPON, así como el estudio de viabilidad del sistema.
- Suministro e instalación de todo el material y componentes necesarios para desplegar la infraestructura óptica pasiva de una red FTTH, que engloba desde el repartidor óptico en cabecera al cual se conectará el puerto de la OLT hasta la roseta óptica (PTRO/ONT) dentro de la vivienda.

- Valoración económica del proyecto completo, en función de las pautas de diseño y arquitectura de red planteadas, y por tanto desglosado por partes: central, red de acceso, RITI, tendido vertical y acceso a la vivienda.

El suministro e instalación del equipamiento activo correrá a cargo de las empresas de cable suministradoras del servicio, al igual que la explotación, servicio y mantenimiento activo de la red.

5.2. Descripción del proyecto

Una vez definidos los objetivos generales del despliegue de la red FTTH, es necesario conocer en profundidad el escenario de despliegue, así como las consideraciones generales de diseño previas a la realización del proyecto, que condicionan y limitan algunos aspectos importantes de la red.

Estos aspectos se han de tomar como medida de referencia y punto de partida para el inicio del diseño del proyecto. Una vez valorados y estudiados estos datos, se procederá a plantear la solución óptima que permitirá establecer una red FTTH en las fincas seleccionadas.

5.2.1. Escenario del despliegue

Para poder realizar un despliegue de infraestructura óptica de la mejor forma posible, es imprescindible conocer el escenario del despliegue, sus particularidades, destacar las características más importantes, etc.

La zona objeto de despliegue se trata de 4 fincas de viviendas multifamiliares ubicadas en el distrito de Vicálvaro (Madrid), con la denominación A7, A8-A y A8-B, A9 y A10 respectivamente. La selección de estas urbanizaciones concretamente, responde a sus características urbanísticas, las cuales permiten la implantación de una red FTTH.

Las 4 fincas corresponden a edificios de nueva construcción que cuentan con ICT según normativa 401/2003 de 4 de abril, y que poseen la infraestructura necesaria para poder implantar sistemas de esta tecnología. A continuación, se muestra una imagen aérea en la que se puede observar el enclave de estas fincas con su nomenclatura correspondiente.



Figura 118: *Fincas objeto del proyecto*

Las características generales de cada finca, dirección catastral, número de portales, altura de los edificios y número de viviendas y locales comerciales, aparecen recogidas en la siguiente tabla.

Finca	Dirección	Portal	Plantas	Viviendas	Locales comerciales	Total de accesos
7	San Cipriano 73		7	20		
	San Cipriano 75		7	20		
	San Cipriano 77		9	26		
	Gran Vía del Este 10		7	20		
	Gran Vía del Este 12		9	26		112
8	San Cipriano 77	A	6	24	2	
		B	6	17		
		C	6	17		
		D	6	22		
		E	6	22		
		F	6	30		
		G	6	30		
		H	6	22		
		I	6	22		
		J	6	17		
		K	6	17		
		L	6	36	1	279
9	Gran Vía del Este 2		8	32		
	Gran Vía del Este 4		6	36	1	
	Villablanca 70		6	36		105
10	Minerva 1		6	24		
	Minerva 3		8	32		
	Minerva 5		6	24		
	Minerva 7		6	24		
	Minerva 13		6	24		
	Minerva 15		8	32	4	
	San Cipriano 61		6	12		
	San Cipriano 63		6	24	5	205
Número total de accesos (viviendas + locales)						701

Figura 119: Características generales de las fincas del proyecto

5.2.2. Consideraciones generales de diseño

El proyecto debe cumplir una serie de requisitos fundamentales, como consecuencia de su funcionalidad como operador neutro, que se recogen a continuación:

- Atendiendo a las recomendaciones del *Informe final sobre los resultados del modelo de despliegue de redes FTTH/GPON en España* [50] presentado por la CMT con fecha 17 de febrero de 2009, es necesario dar cobertura pasiva para al menos tres operadores de cable distintos, que son los que considera el artículo como “viables” a la hora de implantar un sistema FTTH.

- La red deberá estar preparada para soportar al menos dos etapas de división (*splitter*), pero lo suficientemente bien distribuida como para no perder demasiada potencia de señal.
- El índice de penetración de usuarios con servicio, dependerá de los estudios socioculturales que se realicen en la zona, y determinará directamente la relación final de división.
- Cada operador tendrá sus propios recursos. Sin embargo, todo el cableado será común para todos ellos, independientemente del servicio prestado.
- El sistema final deberá cubrir al 100% de las viviendas de todas las fincas, independientemente de si optan o no a los servicios prestados por cada operador.
- En la medida de lo posible, se aprovecharán las canalizaciones existentes para la acometida de cables, minimizando el impacto que supone la realización de obra civil a nivel de costes.

El resto de especificaciones técnicas de arquitectura de red, planificación, elección de materiales, criterios de optimización, etc. dependerá del diseño de red elegido para la solución final del proyecto.

5.3. Diseño del proyecto

El diseño del proyecto se dividirá en varios apartados para concretar cada parte del proyecto lo más detalladamente posible. Estos apartados son: estudio de viabilidad del proyecto, diseño de la central, diseño de la red urbana o local, diseño de la red de acceso, diseño del R.I.T.I. y diseño de la red vertical.

5.3.1. Estudio de viabilidad

Para poder realizar un estudio de viabilidad de la red FTTH, es necesario conocer el estado en el cuál se encuentra la zona objeto de despliegue, más allá de las consideraciones iniciales contempladas en el escenario de despliegue.

Así pues, partiendo de la información del apartado 5.2.1. *Escenario de despliegue* se encargan dos trabajos claramente diferenciados:

- **Realización de un replanteo**, en la que se comprueban los datos de partida respecto a la cartografía, número de viviendas, ubicación de las fincas, posibles canalizaciones existentes en la zona, arquetas de acceso para la red urbana y la red de acceso, situación de la central, situación actual de las viviendas, cables instalados, etc.

- **Realización de un estudio sociocultural estadístico**, para evaluar el índice de penetración de servicio, con el que poder dimensionar la red en previsión de su utilización a corto plazo, y en vistas de ampliación para medio y largo plazo.

5.3.1.1. Replanteo del proyecto

La toma de datos es imprescindible a la hora de elaborar un proyecto por dos razones: contrastar la información previa de la que se dispone en el punto de partida del proyecto, y ampliar dicha información con nuevos datos más concretos recogidos en campo.

Los datos obtenidos a partir del replanteo siempre se certifican en un acta de replanteo, que firman las partes implicadas del proyecto (contrata de ingeniería e instalación, y cliente final) y que marca el inicio de diseño y ejecución del proyecto.

Una vez realizado el replanteo, su acta de replanteo correspondiente arroja los siguientes datos respecto a la finca de Vicálvaro [51]:

- Las medidas en campo de las fincas, se pueden comprobar en el plano **RA01PL01** del Anexo I.
- Se comprueba la existencia de una central de telecomunicaciones en las inmediaciones, concretamente a 985 metros. Tras una inspección visual se certifica espacio libre disponible para la instalación del equipamiento activo de la red y de terminación de la red pasiva, según plano **CA01PL01** del Anexo I.
- Desde la central parten varias canalizaciones subterráneas de telecomunicaciones. Una de ellas posee una ruta a lo largo de la Avenida Gran Vía del Este, confluyendo con la zona donde se encuentran las fincas objeto del proyecto según plano **RU01PL01** del Anexo I.
- La ocupación de la canalización de telecomunicaciones se encuentra al 34% de su capacidad, y cuenta con un total de 10 arquetas de acceso repartidas a lo largo de su recorrido, entre la caseta de la central, y la zona de confluencia con las fincas 7 y 9.
- En esta canalización, se encuentran instalados y en servicio cables de red troncal urbana de fibra. Concretamente, se encuentra instalado un cable de 64 FO de estructura holgada PKP.
- También se comprueba la existencia de canalización eléctrica de baja tensión compartida con telecomunicaciones alrededor de todas las fincas, que confluye con la canalización anterior en una arqueta de conexión denominada ARQ10, según plano **RA01PL01** del Anexo I.

- Esta última canalización, cuenta con un total de 7 arquetas distribuidas a lo largo de su recorrido, y posee una capacidad de ocupación inferior al 22%.
- Tras inspección visual en cada uno de los edificios que conforman las fincas de despliegue, se comprueba la existencia de un R.I.T.I. por cada portal, de la que parte la canalización ICT de cada uno de ellos, según planos **FI07PL01**, **FI07AL01** del Anexo I.
- La canalización ICT de cada portal se encuentra en un grado bajo de ocupación, inferior al 20% en todas las fincas de estudio.

Con estos datos, se conforma un anteproyecto, constituido por un boceto inicial y básico de la red, en el que se determinan las características generales del sistema. De esta forma se decide de forma provisional (hasta el estudio final de instalación) la infraestructura de la red óptica, la ubicación de la central de acceso, la ruta subterránea de la red urbana, la ruta subterránea de la red de acceso, las arquetas de acceso a las fincas, y las canalizaciones de ICT para el acceso a las viviendas de la siguiente manera:

- **Central de acceso:** queda adjudicada como la central de telecomunicaciones detectada en el replanteo, dado su proximidad a las fincas y a su estado de ocupación. En esta central se instalará el equipamiento activo de la red, así como los armarios repartidores y cajas de empalme finales de la red pasiva.
- **Red urbana:** se encuentra ubicada en la canalización subterránea que parte de la central de acceso, y cuyo recorrido atraviesa el lateral este de las fincas 7 y 9, para continuar hacia el norte. El cable de red urbana está constituido por un cable de 64 FO PKP. Será necesario comprobar cuántas fibras se encuentran en servicio y si existen fibras sobrantes suficientes para dotar de servicio FTTH a las fincas objeto. Para ello es necesario localizar al propietario de la finca y consultar.
- **Red de acceso:** queda adjudicado su emplazamiento en la canalización de baja tensión existente. La ruta de la canalización alrededor de las fincas le proporciona la distribución ideal para el tendido de cable de la red de acceso hasta las viviendas a través de las arquetas ICT de cada edificio correspondiente.

A continuación se muestran tres imágenes donde se presentan:

- El boceto con el anteproyecto de la red urbana, incluyendo la información anterior (figura 120).
- El boceto con el anteproyecto de la central de acceso y parte de la red urbana (figura 121).
- El boceto con el anteproyecto de la red de acceso colindante a las fincas objeto del despliegue (figura 122).

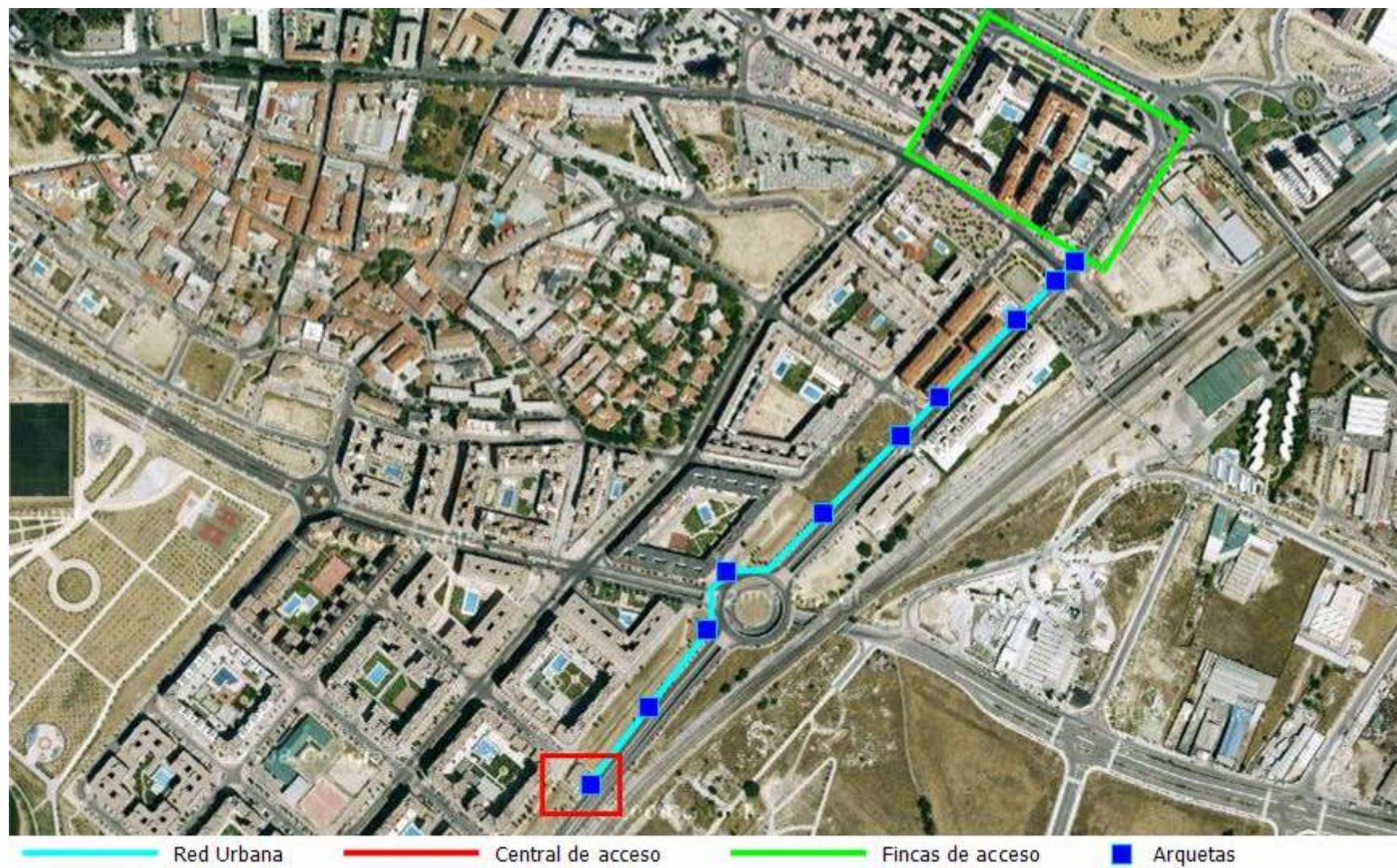


Figura 120: Anteproyecto general de la red urbana



Figura 121: Vista general de la central de acceso



Figura 122: Anteproyecto de la red de acceso

5.3.1.2. Estudio sociocultural estadístico

Paralelamente a los bocetos iniciales de diseño básico, es necesaria la realización de un estudio estadístico que aporte datos reales sobre el índice de penetración de servicio en los usuarios finales. De esta forma, se puede conocer el número de usuarios que demandan servicios FTTH en un futuro próximo, y que decidirán una parte del diseño de despliegue de la red.

Para ello, se encarga la elaboración del *Estudio sociocultural estadístico sobre el sistema FTTH en las Fincas A7, A8, A9 y A10 de Vicálvaro* [52], realizado con una muestra aleatoria simple sobre el 100% de la población objeto de estudio. El estudio recoge 3 preguntas, con varias respuestas diferentes a cada pregunta, siendo éstas las que se muestran en las siguientes tablas estadísticas:

- *¿Es usted consumidor de servicios de telefonía, Internet y/o televisión digital ofrecidos por su proveedor de cable?*

Dato	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
Sí, teléfono, televisión digital e Internet	169	24.1%
Sí, teléfono e Internet	448	63.9%
Sí, teléfono y televisión digital	19	2.71%
No, sólo teléfono o nada	61	8.7%
NS/NC	4	0.57%
Total de encuestados	701	100%

- *¿Desea usted contratar servicios Triple-Play (Internet de muy alta velocidad, televisión digital y telefonía) ofrecidos gracias a la nueva red FTTH que se va a implantar en su domicilio en las próximas semanas?*

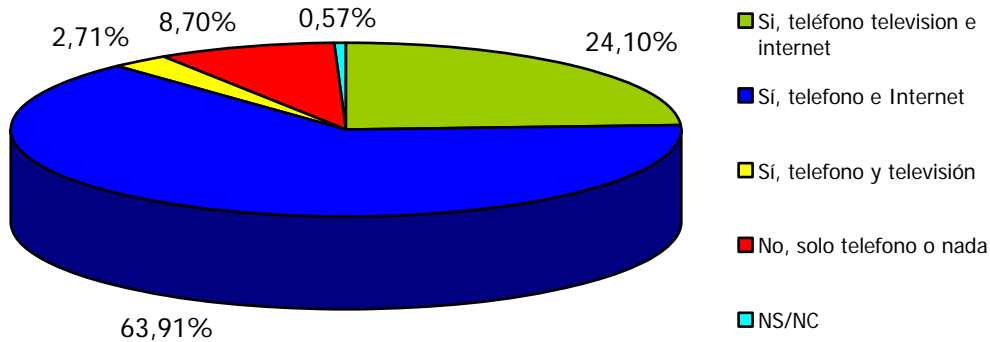
Dato	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
Sí, me interesa	139	19.82%
No, no me interesa	521	74.33%
No en este momento, pero sí en un futuro próximo (< 5 años)	16	2.28%
No en este momento, pero sí en un futuro lejano (> 5 años)	21	2.99%
NS/NC	4	0.57%
Total de encuestados	701	100%

- *¿Cree usted que la implantación de la red FTTH en su edificio beneficia a sus propietarios directa o indirectamente?*

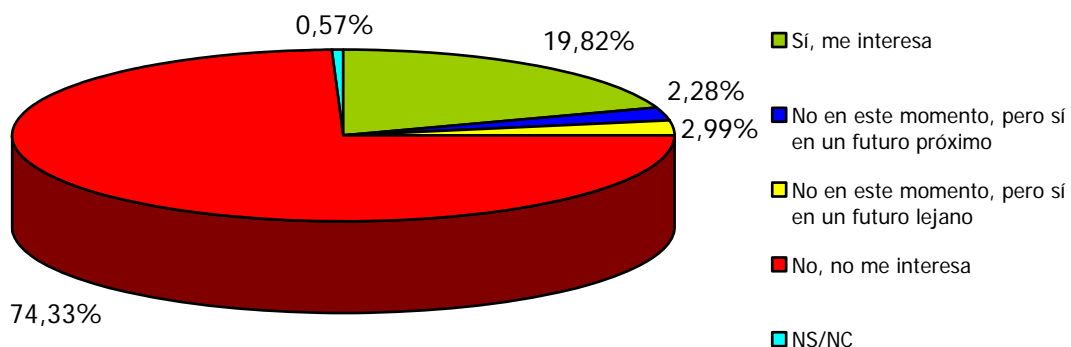
Dato	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
Sí, me parece un servicio de valor añadido	458	65.33%
Sí, aunque no me beneficia directamente	221	31.52%
No, en absoluto	3	0.42%
NS/NC	19	2.71%
Total de encuestados	701	100%

Los gráficos asociados a las tablas anteriores, son los que se muestran en la siguiente imagen.

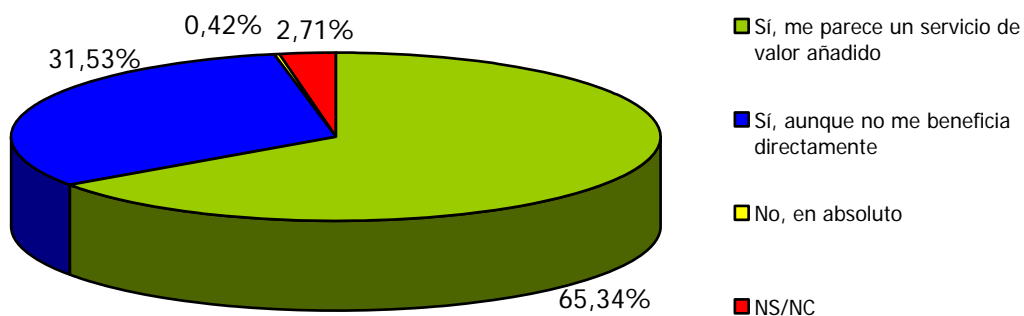
- *¿Es usted consumidor de servicios de telefonía, Internet y/o televisión digital ofrecidos por su proveedor de cable?*



- *¿Desea usted contratar servicios Triple-Play (Internet de muy alta velocidad, televisión digital y telefonía) ofrecidos gracias a la nueva red FTTH que se va a implantar en su domicilio en las próximas semanas?*



- *¿Cree usted que la implantación de la red FTTH en su edificio beneficia a sus propietarios directa o indirectamente?*



De la información anterior, se pueden extraer varias conclusiones, necesariamente analizables para poder realizar un diseño ajustado de la red, en el que se cumplan las expectativas de servicio inmediato, y que cubra de forma razonable las necesidades futuras.

La primera pregunta, relativa al consumo de servicios de banda ancha, aporta que más del 90% de los residentes en las fincas de estudio, son consumidores habituales de servicios variados de cable. Esto implica una parte muy considerable de los propietarios deben ser considerados como consumidores en potencia de los servicios ofrecidos por la nueva red FTTH, y la red debe estar preparada para acogerlos. Independientemente de si contratan dichos servicios a corto o medio plazo, sí pueden solicitarlos transcurridos varios años, lo que conllevará un gasto muy sensible si la red no cuenta con ellos a la hora de dimensionarla.

La segunda pregunta, que hace referencia directamente a si desean contratar los servicios ofrecidos por la nueva red FTTH, muestra varios datos interesantes de análisis. Teniendo en cuenta los usuarios que sí desean contratar los servicios de forma inmediata se puede extraer que el índice de penetración del sistema a corto plazo alcanza casi el 20%. Si a esta cifra se le añade el número de usuarios que pretenden contratar los servicios en un futuro cercano, el índice de penetración del sistema a medio plazo se encuentra en el orden del 22%. Por lo tanto, el diseño de la red debe de planificarse para que pueda dar servicio a un 22% de los usuarios de las fincas. No obstante, el dimensionado de la red deberá estar preparado para aumentar en un futuro este porcentaje de abonados.

La última pregunta, relativa al valor añadido que puede otorgar el sistema FTTH a las viviendas objeto, refleja una vinculación directa entre la instalación de la nueva red y el valor de mercado de la vivienda según el 96% de los encuestados. Este dato aventura que los propietarios obtienen un beneficio directo o indirecto de la instalación de la red, y por lo tanto, su instalación no debe de suponer un problema para ellos. Esto implica que los propietarios se encuentran predispuestos a llegar a acuerdos de ocupación y obras más fácilmente, y el proyecto de instalación pueda ser autorizado en Junta de Gobierno de cada comunidad.

5.3.2. Diseño de las características generales de la red

Partiendo de los datos obtenidos en el análisis de viabilidad, el diseño completo de la red se dividirá en 3 partes para simplificar su estructura: diseño de la central de acceso, diseño de la red urbana y diseño de la red de acceso, y que se detallarán a lo largo de los siguientes apartados. Sin embargo, y previo al diseño específico de cada parte, es necesario concretar aspectos generales de la red estrictamente necesarios para poder llevar a cabo un estudio pormenorizado de cada parte.

Atendiendo a las especificaciones y consideraciones generales de diseño descritas en el apartado 4.2.2, a pesar de contar con un dimensionado de la red sobre el 100% de las viviendas, es necesario realizar un diseño de la red de acuerdo a la futura demanda de servicios. El índice de penetración del sistema según los datos del estudio estadístico

realizado en el apartado 4.3.1.2, será del orden del 22% a medio plazo, por lo que el número total de usuarios finales conectados será:

$$N^{\circ} \text{ abonados} = 701 \cdot \frac{22}{100} \approx 155 \text{ usuarios} \quad (119)$$

Los usuarios que desean darse de alta en el servicio a largo plazo, no se deben considerar en el cálculo del índice de penetración final de usuarios, puesto que la inversión que supone la instalación para poder dar servicio en un futuro a estos abonados no se amortiza en ningún momento. El hecho de que un usuario pueda darse de alta transcurridos más de 5 años, implica que el sistema pueda quedarse obsoleto frente a nuevos elementos ópticos instalables, puesto que la tecnología óptica avanza muy rápidamente. El dar de alta a un abonado a través de recursos anticuados respecto a la tecnología del momento, supone un mayor coste que la instalación de nuevos productos.

La explotación y mantenimiento de elementos ópticos obsoletos implican un mayor coste que la instalación de nuevos elementos de red. Además, este grupo de usuarios poseen menor probabilidad de convertirse en abonado de servicio, por lo que es probable que estos usuarios no acaben dándose de alta en el sistema (lo que supone un incremento del coste de implantación de la red en este momento). Se consideran, por lo tanto, como usuarios no potenciales de contratar servicios.

Teniendo en cuenta nuevamente las consideraciones generales de diseño, era necesario realizar un despliegue con al menos dos etapas de división. Estas dos etapas de división se deben ajustar además, a otras dos consideraciones generales de diseño:

- a) permitir el acceso al menos a 3 operadores de cable
- b) dar servicio hasta 155 usuarios según el índice de penetración esperado

Por lo tanto, en vista de cumplir lo anterior, se establecen dos etapas de división del sistema:

- **Primera etapa de división:** permitirá separar de manera organizada los servicios prestados por los diferentes operadores. De esta manera, la fibra troncal procedente de la red urbana se dividirá en al menos tres salidas, es decir, una fibra dedicada a cada operador.
- **Segunda etapa de división:** permitirá a los operadores ofrecer los servicios a los abonados. Concretamente deberá optimizar la división para alcanzar 155 usuarios finales en activo, en vista de los resultados del índice de penetración.

Para poder escoger el número y tipo de divisores de la red que optimicen el sistema en cuanto a ocupación, índice de penetración, organización y costes, es necesario extrapolar el índice de penetración total del sistema a cada finca en cuestión. Este

proceso supone aplicar la media ponderada del índice de penetración a la población de cada finca. Así pues, los resultados obtenidos de esta estimación se reflejan en la siguiente tabla.

Finca	Usuarios por finca (A)	Usuarios totales potenciales de servicio (B)	Cuota ponderada del índice de penetración por finca $(C) = (A)/701$	Usuarios potenciales de servicio por finca $(D) = (B) \cdot (C)$
7	112	155	0,1597	24,75
8	279		0,398	61,69
9	105		0,1497	23,20
10	205		0,2924	45,32

Figura 123: Resultados de la estimación según el índice de penetración

De esta forma, se obtienen los datos de usuarios potenciales demandantes de servicio por cada finca. Por tanto, redondeando los datos anteriores y comparándolos con el índice de penetración total, el número de usuarios potenciales demandantes de servicio para cada finca son:

- **Finca 7:** 25 usuarios
- **Finca 8:** 62 usuarios
- **Finca 9:** 23 usuarios
- **Finca 10:** 45 usuarios

A continuación, es necesario escoger los divisores de la red en función de las dos etapas de división comentadas anteriormente. Para ello, es necesario fijar una relación total de división para la red, que se subdividirá entre las dos etapas de división. Lo más lógico es fijar una relación de división máxima de 1:64, puesto que a mayor número de divisiones menor potencia de la señal enviada por el OLT llegará a los ONT de los usuarios. La relación 1:64 es la más recomendada en redes FTTH para evitar demasiadas divisiones de señal y demasiada atenuación por divisor [6].

Los divisores ópticos introducen divisiones del orden 2^N , donde N es el número de divisiones o ramificaciones del divisor, según la siguiente tabla:

Divisor	Divisiones	Cálculo divisor	Salidas	Nomenclatura técnica
A	1	2^1	2	1:2
B	2	2^2	4	1:4
C	3	2^3	8	1:8
D	4	2^4	16	1:16
E	5	2^5	32	1:32
F	6	2^6	64	1:64
G	7	2^7	128	1:128

Figura 124: Resultados de la estimación según el índice de penetración

A tenor del índice de penetración, bastaría con escoger divisores tipo F de 1:64, para dar servicio al total de usuarios en potencia de demanda por finca. Sin embargo, el hecho de contar con dos etapas de división, obliga a seleccionar dos divisores de rango inferior de tal forma que la relación total de división sea 1:64, como un divisor de tipo F.

La primera etapa de división bastaría con escoger un divisor de tipo B, es decir un divisor de 1:4. De esta forma, optimizaríamos la primera etapa de división otorgando una fibra de salida dedicada a cada finca. Este hecho permite canalizar los servicios de cada finca independizándola del resto.

La segunda etapa de división, sería la consecutiva a la anterior hasta completar la relación de 1:64. En este caso, el número de salidas de los divisores de la segunda etapa viene dado por la división entre la relación de división de la primera etapa y la relación total de división:

$$2^{\circ} \text{ etapa} = \frac{\text{relación}_{1^{\circ} \text{ etapa}}}{\text{relación}_{\text{total}}} = \frac{1:4}{1:64} = \frac{64}{4} = 16 \text{ salidas} \quad (120)$$

Por lo tanto, el divisor óptico a seleccionar para la segunda etapa de división será aquel cuya relación sea 1:16, es decir un tipo D.

El número total de divisores necesarios en la red, se decidirán en los diseños parciales de red urbana y de red de acceso, así como el resto de elementos de red, tales como cajas de distribución, cajas de empalme, armarios, tipos de fibra, conectores, empalmes, etc.

5.3.3. Diseño de la red de acceso

La red de acceso incluye la parte de la red encargada de la distribución final de la señal procedente del OLT hasta las viviendas, más concretamente hasta las ONT instaladas en las mismas. La alimentación de la red de acceso proviene de las fibras ópticas de la red troncal urbana. Estas fibras ópticas, aún por dimensionar, confluyen en los divisores de primera etapa, que ramifican la señal hasta cada finca.

Dado el volumen de información que supone el diseño de la red de acceso, es conveniente dividir el estudio en tres partes claramente diferenciadas:

- Diseño del acceso a las fincas, que incluye el tramo de red entre el punto de conexión con la red urbana y el R.I.T.I. de cada finca.
- Diseño del R.I.T.I.
- Diseño de las verticales de cada edificio.

5.3.3.1. Diseño del acceso a las fincas

La red de acceso a las fincas está comprendida por la arqueta ARQ10 donde se produce la intersección con la red urbana, los divisores de primera etapa que distribuyen los servicios de las tres fibras a cada finca de estudio y las fibras ópticas distribuidoras de primera etapa desde los divisores hasta los distintos R.I.T.I.s.

El dimensionado de cables de fibra óptica se realizará a partir de la utilización de una fibra óptica por cada enlace final de usuario, es decir, enlace monofibra bidireccional, multiplexando bajo el mismo medio de transmisión los canales de bajada y subida de datos. Este hecho permite ahorrar costes de implantación de la red, así como economización de espacio.

En la mayoría de los diseños de redes FTTH que se han ido realizando como modelos piloto en algún punto de la geografía española, es muy común instalar los divisores ópticos de primera etapa en la central de acceso. De esta forma, queda organizado en cabecera tanto el equipamiento activo, como la red terminal pasiva incluyendo la primera etapa de división. Además de este motivo, la instalación de divisores de primera etapa en la central optimiza teóricamente la utilización de los puertos OLT de los operadores, dado que los árboles PON se van constituyendo gradualmente con las fibras que llegan a las fincas donde aparecen los primeros clientes [6].

Sin embargo, en este diseño se ha optado por la instalación de divisores de primera etapa en una arqueta próxima a las fincas (ARQ10), aprovechando este nivel de división en la segunda etapa al existir menos pérdidas de enlace (menor recorrido de la señal dividida). Las principales ventajas de la solución escogida son las que se enumeran a continuación:

- Menor ocupación del cable de 64 FO de red urbana, ocupándose menos fibras ópticas activas frente a las 12 fibras (4 por operador) si se hubiera realizado la división en la central.
- Como consecuencia de lo anterior, una mayor reserva de las fibras para futuros servicios y ampliaciones, tanto de la red FTTH como otros servicios propios del propietario de la red, frente al primer supuesto donde la ocupación del cable es 2 veces mayor.
- Posibilidad de un aumento del índice de penetración en mayor grado al depender el aumento de éste en mayor medida de la red de acceso final y no de la red urbana.
- Mayor facilidad de manipulación dado que el número de cables terminados es menor, frente a una mayor complejidad en el excesivo número de cables a terminar en un único punto.
- Reducción del coste total de la instalación final.

Esta propuesta supone implícitamente que la arqueta escogida como punto concentrador de unión entre la red de acceso y la red urbana sea lo suficientemente grande como para albergar una caja de empalme con capacidad para albergar varios divisores.

La arqueta ARQ10 se encuentra instalada en acera a nivel del suelo, y posee las dimensiones de 140 x 110 x 100 cm de longitud, anchura y profundidad respectivamente. En esta arqueta se realizará la segregación de las fibras del cable de red urbana para dar servicio a la red de acceso. Esta segregación consiste en extraer las tres fibras y conectorizarlas en los divisores de primera etapa de la red.

El primer paso es dimensionar el número de divisores de primera etapa de 1:4 se necesitan para cumplir las condiciones de índice de penetración impuestas en las condiciones de diseño de la red, siendo éste del 22%. Este porcentaje supone un total de 155 usuarios que, distribuidos por finca quedan de la siguiente manera:

- **Finca 7:** 25 usuarios
- **Finca 8:** 62 usuarios
- **Finca 9:** 23 usuarios
- **Finca 10:** 45 usuarios

Al ser divisores tipo B de 1:4, bastaría con un divisor por cada operador para dar servicio a las 4 fincas. Es decir, cada salida del divisor correspondería con una fibra de acceso a una finca determinada. Como la red se va dimensionar para que 3 operadores puedan ofrecer servicio, se deben instalar un total de 3 divisores de primera etapa (uno por cada operador). Cada divisor repartirá equitativamente la señal de entrada de un operador determinado en 4 señales, cada una de ellas en dirección a una finca distinta. Sin embargo, este dimensionamiento no sería correcto si no se tuviese en cuenta la segunda etapa de la red, en la que es necesario prestar servicio al número de usuarios por finca especificado anteriormente.

Según las características generales de diseño, la segunda etapa de división de la red estaba constituida por divisores de tipo D de 1:16, que suponen un relación total de división de 1:64, criterio impuesto como diseño necesario para que la señal no se vea deteriorada por las pérdidas de división. El número total de divisores de segunda etapa corresponderá por motivos de organización, espacio y facilidad de instalación, explotación y mantenimiento, al número de fibras que llegan a cada finca procedentes de los divisores de primera etapa. Es decir, se dispone inicialmente de 3 divisores de primera etapa con 4 salidas cada uno. Cada una de estas salidas corresponde a una fibra de acceso en dirección a cada finca, de tal forma que el número total de fibras que llegan a cada finca es de 3 (una de cada operador), tal y como se muestra en el siguiente esquema.

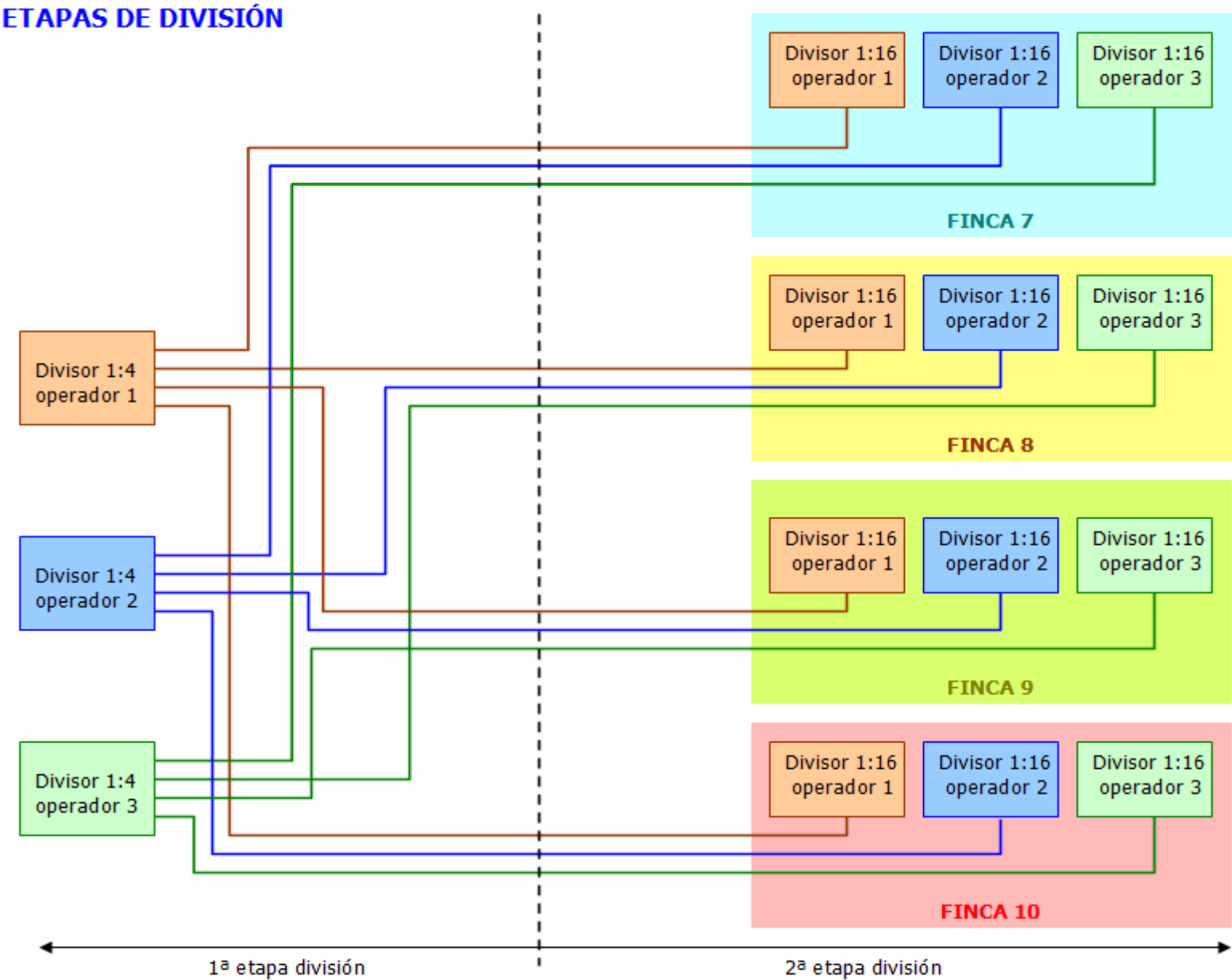


Figura 125: Etapas iniciales de división de la red

Ahora es necesario comprobar si con el número de divisores que se han dimensionado, se consigue dar servicio al índice de penetración de estudio. Para ello, se detallará por fincas el dimensionado del número de divisores:

• **Finca 7**

El número de abonados al que es necesario prestar servicio en esta etapa del despliegue, corresponde a 25 usuarios según el índice de penetración. La instalación de 3 divisores de tipo D de 1:16, uno por operador, en esta finca implica poder prestar servicio a un total $16 \cdot 3 = 48$ usuarios entre los tres operadores. Por lo tanto, el número de usuarios a los que se va a poder prestar servicio es mayor que el número de usuarios potenciales de demanda de servicio ($48 \text{ usuarios} > 25 \text{ usuarios}$), y por lo tanto es viable el dimensionado de divisores para esta finca. El poder prestar el servicio a 48 usuarios implica dimensionar la red de servicio para un índice de penetración de:

$$\text{Índice de penetración efectivo}_{\text{FINCA 7}} = \frac{48 \text{ usuarios}}{112 \text{ usuarios}} \cdot 100 = 42.85\% \quad (127)$$

La condición de partida según los estudios sociológicos era prestar servicio al 22% de los usuarios de la finca, pero gracias al diseño optimizado para esta finca, se va a poder prestar servicio a un 20.85% más de los usuarios.

• **Finca 8**

El número de abonados al que es necesario prestar servicio en esta etapa del despliegue, corresponde a 62 usuarios según el índice de penetración. La instalación de 3 divisores de tipo D de 1:16, uno por operador, en esta finca implica poder prestar servicio a un total $16 \cdot 3 = 48$ usuarios entre los tres operadores. Por lo tanto, el número de usuarios a los que se va a poder prestar servicio es menor que el número de usuarios potenciales de demanda de servicio ($48 \text{ usuarios} < 62 \text{ usuarios}$), y por lo tanto no es viable el dimensionado de divisores para esta finca.

En este caso, debido al gran número de usuarios potenciales de servicio que existe, es necesario ampliar el número de divisores en la finca. La incorporación de un nuevo divisor tipo D de 1:16 aumentaría la tasa de abonados de 48 a 64, lo que se consideraría suficiente para cubrir la demanda de los 62 usuarios de índice de penetración. Sin embargo, ese nuevo divisor quedaría sin asignar a un operador en concreto, y por lo tanto sus fibras de salida podrían ser de varios operadores.

El hecho de mezclar diferentes operadores en un mismo divisor, es una solución que provocaría problemas de explotación y mantenimiento de la red. Los servicios de un operador no tendrían su infraestructura independiente, y cabe la posibilidad de producirse conflictos entre operadores. Además, tampoco se estaría cumpliendo la condición de diseño por la cual se debían de establecer tres redes PON totalmente independientes entre sí.

Para evitar que un mismo divisor pueda dar servicio a varios operadores y conseguir que todos los operadores tengan su propia infraestructura independiente de los demás, es necesario ampliar un divisor por cada operador, es decir, incluir en el diseño 3 divisores tipo D de 1:16 más en la finca 7 paralelamente a los otros tres. El diseño final de la finca, quedaría constituido por 6 divisores tipo D de 1:16, dos por cada operador. Con este nuevo diseño, el número total de usuarios a los que se podría prestar servicio sería de $6 \cdot 16 = 96$ usuarios entre los tres operadores. Ahora sí se cubre el índice de penetración, puesto que $96 \text{ usuarios} > 62 \text{ usuarios}$ demandantes de servicio.

El índice de penetración con este nuevo dimensionado para la finca 8 quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Índice de penetración efectivo}_{\text{FINCA 8}} = \frac{96 \text{ usuarios}}{279 \text{ usuarios}} \cdot 100 = 34.4\% \quad (128)$$

La condición de partida según los estudios sociológicos era prestar servicio al 22% de los usuarios de la finca, pero gracias al diseño optimizado para esta finca, se va a poder prestar servicio a un 34.4% más de los usuarios.

• **Finca 9**

El número de abonados al que es necesario prestar servicio en esta etapa del despliegue, corresponde a 23 usuarios según el índice de penetración. La instalación de 3 divisores de tipo D de 1:16, uno por operador, en esta finca implica poder prestar servicio a un total $16 \cdot 3 = 48$ usuarios entre los tres operadores. Por lo tanto, el número de usuarios a los que se va a poder prestar servicio es mayor que el número de usuarios potenciales de demanda de servicio ($48 \text{ usuarios} > 23 \text{ usuarios}$), y por lo tanto es viable el dimensionado de divisores para esta finca. El poder prestar el servicio a 48 usuarios implica dimensionar la red de servicio para un índice de penetración de:

$$\text{Índice de penetración efectivo}_{\text{FINCA 9}} = \frac{48 \text{ usuarios}}{105 \text{ usuarios}} \cdot 100 = 45.71\% \quad (129)$$

La condición de partida según los estudios sociológicos era prestar servicio al 22% de los usuarios de la finca, pero gracias al diseño optimizado para esta finca, se va a poder prestar servicio a un 45.71% más de los usuarios.

• **Finca 10**

El número de abonados al que es necesario prestar servicio en esta etapa del despliegue, corresponde a 45 usuarios según el índice de penetración. La instalación de 3 divisores de tipo D de 1:16, uno por operador, en esta finca implica poder prestar servicio a un total $16 \cdot 3 = 48$ usuarios entre los tres operadores. Por lo tanto, el número de usuarios a los que se va a poder prestar servicio es mayor que el número de usuarios

potenciales de demanda de servicio (48 usuarios > 45 usuarios), y por lo tanto es viable el dimensionado de divisores para esta finca. El poder prestar el servicio a 48 usuarios implica dimensionar la red de servicio para un índice de penetración de:

$$\text{Índice de penetración efectivo}_{\text{FINCA 7}} = \frac{48 \text{ usuarios}}{205 \text{ usuarios}} \cdot 100 = 23.41\% \quad (130)$$

La condición de partida según los estudios sociológicos era prestar servicio al 22% de los usuarios de la finca, pero gracias al diseño optimizado para esta finca, se va a poder prestar servicio a un 1.41% más de los usuarios.

El diseño final ha obligado a introducir tres nuevos divisores en la finca 8, lo que supone un total de 6 divisores en vez de 3 tal y como se había propuesto inicialmente. Este hecho, implica que a la finca 8 llegan 6 fibras de acceso procedente de los divisores de primera etapa, y no 3. Estos divisores tipo B de 1:4 tenían saturadas todas sus salidas de fibra, puesto que se había dimensionado para que cada una de sus salidas (fibras) ofrecieran servicio a cada finca.

Puesto que es necesario introducir 3 fibras de acceso más, una por operador, para poder alimentar a los 3 nuevos divisores (también, uno por operador) y no se pueden extraer de los divisores de primera etapa, vuelve a ser necesario ampliar el número de divisores de primera etapa, concretamente uno por operador. Es decir, consiste en reflejar la modificación realizada en la finca 8 sobre los divisores de primera etapa.

Cabe la posibilidad de plantearse la instalación de un divisor tipo C de 1:8, en vez de dos divisores de 1:4 en los divisores de primera etapa. Sin embargo, este hecho rompería con la condición de diseño establecida de mantener un rango de división de red de 1:64, puesto que con una primera etapa de 1:8 y una segunda etapa de 1:16 se obtendría un rango de división de $8 \cdot 16 = 128$. Con este rango se produciría una división muy elevada de la potencia de señal procedente del OLT y una mayor atenuación, lo que podría convertir el sistema en inviable.

También cabe pensar la posibilidad de incluir divisores de menor rango, por ejemplo de tipo A de 1:2, dado que tan sólo es necesaria una fibra más de salida por cada operador que alimente a los divisores de segunda etapa de la finca 8. Sin embargo, el sistema quedaría desorganizado en cuanto a potencia se refiere. Con esta nueva división tendríamos una primera etapa de 1:2 y la segunda etapa de 1:16, lo que supone un rango total de división de $2 \cdot 16 = 32$. Con este nuevo rango, se desestabilizaría el sistema, puesto que existiría una diferencia en la potencia de salida del OLT entre unos divisores y otros, y puede producir problemas de explotación y mantenimiento.

La solución óptima por lo tanto, pasa por fijar un mismo rango de división para todos los divisores de primera etapa, y otro rango fijo para los divisores de segunda etapa, de tal forma que siempre se tenga un rango total de división de 1:64, repartidos en dos etapas, la primera de 1:4 y la segunda de 1:16. El nuevo y definitivo esquema de diseño de la red de acceso, quedaría reflejado según la siguiente imagen.

ESQUEMA DE DISEÑO DE LA
RED DE ACCESO

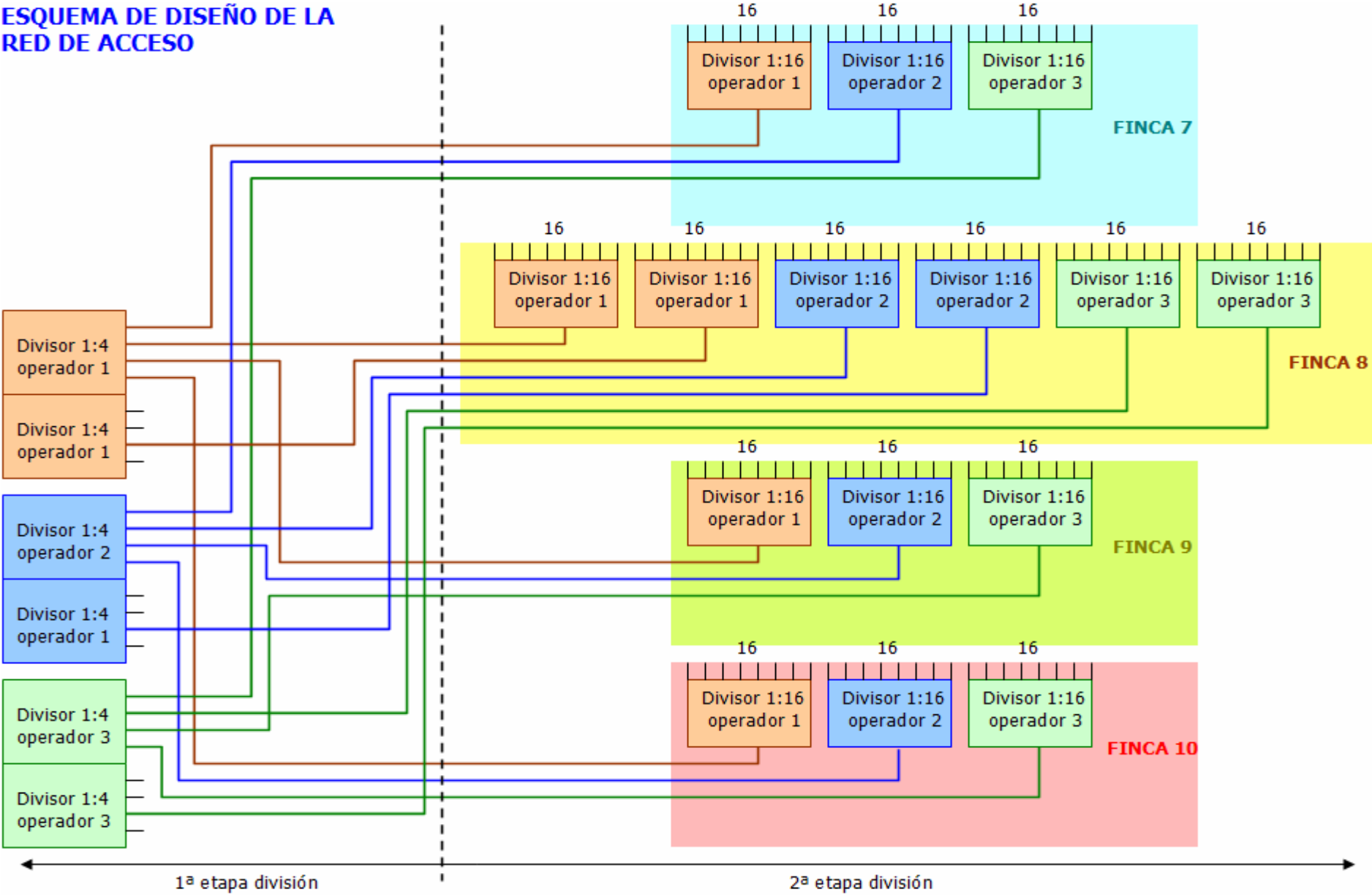


Figura 126: Esquema de diseño definitivo de la red de acceso

Una vez conocido el número exacto de divisores de primera y segunda etapa, es necesario continuar con el diseño de la infraestructura de la red de acceso hasta a las fincas. En esta etapa también se incluía la ubicación de los divisores de primera etapa, las fibras de acceso a las fincas y la ruta de canalización de las mismas.

La arqueta ARQ10 será la ubicación donde se produzca la segregación de las fibras de la red urbana, para poder dar servicio a las fibras de la red de acceso. Además, también será la ubicación de los divisores de primera etapa de la red. Para realizar ambos procesos, es necesaria la instalación de una caja de empalme de exterior capaz de albergar las fusiones entre las 3 fibras de la red urbana, los divisores de primera etapa, y las 5 fibras por divisor de la red de acceso.

La caja seleccionada es una caja de empalme de exterior marca Tyco modelo FIST-GCOG2 capaz de albergar hasta 240 empalmes distribuidos en 20 bandejas (12 empalmes por bandeja). En esta caja se instalarán concretamente los 6 divisores preconectorizados, dos por cada operador. Los divisores de primera etapa seleccionados son los divisores sin conector tipo PLC de ADC-Krone especialmente fabricados para instalar en bandejas de empalme. Cada uno de estos divisores ocupa una bandeja de empalme, por lo que se estarían ocupando 6 de las 20 bandejas disponibles. El resto de bandejas quedan a disposición de futuras ampliaciones de la red.

En cada una de estas bandejas de divisores, se producen dos conectorizaciones a ambos lados del divisor:

- Conectorización de la fibra de red urbana a la entrada del divisor, a través de latiguillo preconectorizado del divisor. Para ello, es necesario realizar una fusión entre la fibra óptica de la red troncal y el latiguillo.
- Conectorización de las fibras de red de acceso a las salidas del divisor, a través de latiguillos preconectorizados del divisor. Para ello, es necesario realizar una fusión entre cada fibra óptica de la red de acceso y el latiguillo.

Teniendo en cuenta que el diseño cuenta con 6 divisores de primera etapa de 1:4, y que todos ellos se encuentran alimentados por cables de red troncal, el número total de fusiones entre la red troncal y la entrada de los divisores es de 6, una por cada divisor. Además, estos divisores se encuentran organizados por operador, de tal forma que cada uno de ellos dispone de dos divisores para ofrecer el servicio final. De estos dos divisores por operador, tan sólo se fusionarán 5 de las 8 salidas disponibles (4 salidas del primer divisor, y una salida del segundo divisor). Por lo tanto, el número total de fusiones a la salida de los divisores es de $5 \text{ salidas} \cdot 3 \text{ divisores} = 15 \text{ fusiones}$. A continuación, se muestra un esquema aclarativo del número de fusiones en la figura 127:

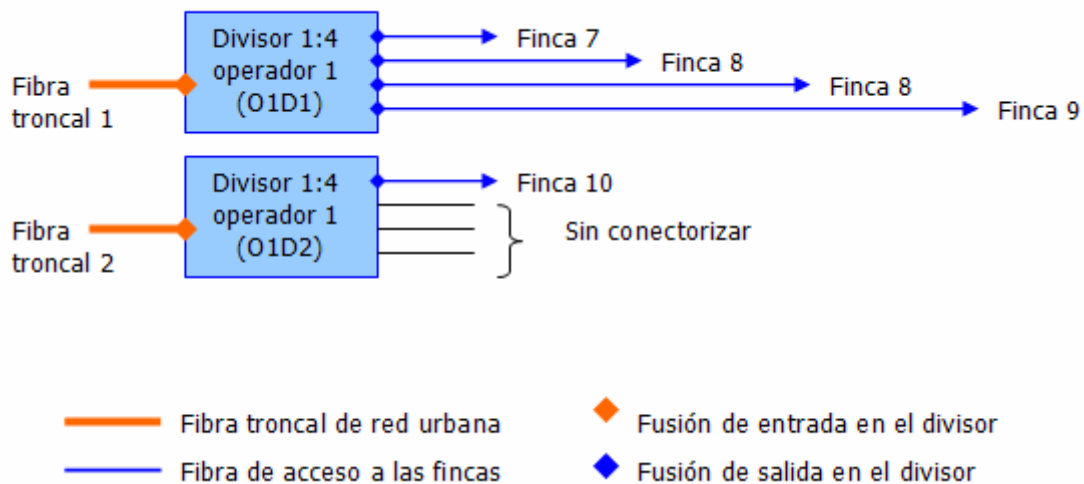


Figura 127: Primera etapa de división del operador 1

Como se puede comprobar en la figura anterior, el número total de fusiones a realizar por cada primera etapa de división de un operador es de 7 fusiones, 2 fusiones a la entrada de los divisores, y 5 fusiones a la salida de los mismos. Como el diseño de red está implementado para 3 operadores, el número total de fusiones será de $7 \cdot 3 = 21$ fusiones en la primera etapa de red.

A continuación, es necesario concretar dos aspectos más de la red de acceso a las viviendas. Se trata del cableado de la red de acceso, es decir, los cables ópticos que albergarán las fibras de acceso a las fincas, desde los divisores de primera etapa hasta los divisores de segunda etapa.

Lo primero que se necesita para poder determinar el tipo de cable óptico, es concretar la ubicación de los divisores de segunda etapa. La mejor forma de optimizar la red en cuanto a facilidad de instalación y mantenimiento, es ubicar los divisores de segunda etapa en el interior de las fincas, y por lo tanto, en los R.I.T.I.s de los edificios.

A cada finca de viviendas llegan 3 fibras de acceso, una por operador, a excepción de la finca 8, donde llegan 6 fibras de acceso, dos por operador. Lo lógico es establecer un cable óptico de acceso para cada finca, que contenga las fibras de acceso de los tres operadores. Este planteamiento es válido para las fincas 7, 9 y 10 que tan sólo poseen un divisor por operador en el acceso a las viviendas. Sin embargo, la finca 8 posee 6 divisores de segunda etapa, dos por cada operador, y la mejor forma de optimizar el reparto de fibras en la finca, es dividir en dos partes la entrada de fibras de acceso a la misma.

Dado que la finca 8 se encuentra dividida en dos subfincas, 8-A y 8-B, se puede dividir las fibras de acceso en dos cables: un cable con tres fibras activas que ofrezca servicio a la subfinca 8-A, y otro cable con otras tres fibras activas que ofrezca servicio a la subfinca 8-B. Este reparto implica la instalación de dos cables diferentes dentro de una misma finca y además de diferentes longitudes, puesto que ambas acabarán en zonas distintas de la finca 8. Sin embargo, ofrece diversas ventajas que compensan lo anterior:

- Se organiza mejor el cableado de la finca, puesto que queda dividida en dos a modo de fincas independientes.
- Como consecuencia de ser independientes, se facilita la instalación y mantenimiento de la red, dado que se trabaja con menos cables simultáneamente y es más sencillo localizar focos incidencias.
- Permite un mayor grado del índice de penetración en caso de futuras ampliaciones de la red. Si los usuarios demandan más servicios o bien se adhieren más usuarios, la red dispondrá de mayor número de fibras como recurso de ampliación.
- Se reduce la longitud de las tiradas verticales (ICT) del edificio, puesto que ahora existen dos puntos de partida diferentes. Cada uno de ellos dará servicio a las viviendas más próximas de su entorno. Con un solo cable de acceso, las tiradas verticales hacia algunas zonas de las fincas hubieran sido demasiado largas, aumentando la atenuación global del sistema.

Estos cables de acceso discurrirán a través de canalización de baja tensión según los datos tomados en el replanteo de las fincas. Esto supone una ventaja respecto al cableado coaxial o de pares, dado que los cables de fibra no se ven afectados por los campos electromagnéticos creados por las líneas de tensión.

El cableado de acceso tendrá que tenderse bajo tierra en exterior a través de conductos, hasta llegar a los R.I.T.I.s de cada finca. Además, la canalización existente cuenta con arquetas de acceso a cada finca, tanto de baja tensión como de ICT, por lo que la convierte en la ruta de acceso óptima a las fincas. El cable que mejor se adapta a este tipo de recorridos compartidos de exterior e interior, es del tipo TKT válido para ambos casos. Por lo tanto, el cable escogido para la red de acceso, comprendida entre la arqueta ARQ10 y los diferentes R.I.T.I.s de cada finca, es un cable de 6 FO TKT marca OPTRAL modelo CDIX-LT, válido para interior y exterior. De las 6 fibras que posee el cable, se utilizarán 3, una por cada operador, de tal forma que el reparto de cables y fibras activas por finca viene dado de la siguiente forma:

Finca	Número de cables TKT	Fibras activas por cable TKT	Fibras activas totales
7	1	3	3
8	2	3	6
9	1	3	3
10	1	3	3
Total cables TKT	5	Total fibras activas	15

Figura 128: Fibras y cables dimensionadas para la red de acceso a las fincas

El recorrido a través de la canalización de baja tensión para el acceso a las fincas, así como las arquetas de acceso a las mismas (ICT o baja tensión) se encuentra disponible en el plano **RA01PL01** del Anexo I.

5.3.3.2. Diseño del R.I.T.I. de cada finca

Una vez determinados los cables de acceso a las fincas, es necesario definir la terminación concreta de dichos cables. Este dato que no se ha podido detallar en el apartado anterior, se encuentra directamente relacionado con la ubicación del R.I.T.I. de cada finca. Así pues, será el R.I.T.I. de cada finca el punto de finalización de los cables de acceso.

La ubicación exacta de cada R.I.T.I., viene determinada por varios aspectos propios de cada finca:

- Debe de ser un punto lo más céntrico posible dentro la finca, de forma que se reduzca al mínimo la longitud del cableado vertical de las viviendas.
- Debe de tener las dimensiones necesarias para albergar un armario repartidor de dimensiones específicas para contener todas las fibras del tendido vertical, las fibras de acceso y los divisores de segunda etapa.
- Debe de tener fácil acceso desde la canalización de baja tensión, a través de la cuál se va a tender el cable TKT de 6 FO de acceso a las fincas. Esta condición es indispensable, dado que si cumple las dos anteriores pero el cable de acceso TKT no es viable de instalar, no podrá seleccionarse dicho R.I.T.I. como el idóneo para alimentar a todas las viviendas de la finca.

El R.I.T.I. es la parte terminal de la red de acceso. Es por ello que debe albergar varios elementos clave de la red FTTH. En función del cableado de acceso TKT del apartado anterior, es necesario ubicar 5 R.I.T.I.s a lo largo de las fincas objeto, uno en cada finca, a excepción de la finca 8 donde se instalarán dos R.I.T.I.s, uno en la finca 8-A y otro en la finca 8-B.

En cualquier caso, el R.I.T.I. debe de estar constituido por los siguientes elementos:

- 1 cable de acceso TKT 6 FO con las 3 fibras activas una por cada operador.
- 3 divisores de segunda etapa de la red, que prestarán servicio a los usuarios finales, uno por cada operador.
- Cableado vertical del edificio de acceso final a las viviendas, que se detallarán en el apartado 5.3.3.3 *Diseño de las verticales*.

Para poder instalar todos estos elementos en un único punto, es necesaria la instalación de un concentrador de finca, técnicamente denominado armario repartidor de finca o caja terminal óptica (CTO). El armario seleccionado para tal fin es el marca Prysmian modelo MDU, de dimensiones 140 x 80 x 40 de altura, anchura y profundidad respectivamente. Este armario está constituido por 16 bandejas de empalme, cada una de las cuales puede albergar hasta 4 empalmes mecánicos o por fusión.

Además, en tres de dichas bandejas, será necesario instalar los 3 divisores de segunda etapa tipo D de 1:16, marca ADC-Krone sin preconectorizar, cada uno de los cuales ocupa una bandeja de empalme. El número total de bandejas de empalme sobrantes es de 13 dedicadas a albergar el cableado sobrante de los empalmes entre las fibras verticales y las salidas de los divisores, y entre la entrada de los divisores y las fibras de acceso del cable TKT.

El total de empalmes a realizar en cada armario MDU son:

- Un empalme por fusión de cada fibra de acceso con el latiguillo de conexión del puerto de entrada del divisor de segunda etapa de 1:16, lo que supone un total de 3 empalmes.
- Un número indeterminado de empalmes mecánicos entre la fibra vertical de acceso a las viviendas y el latiguillo de conexión del puerto de salida del divisor de segunda etapa de 1:16. Estos empalmes se irán realizando según se vayan dando de alta los usuarios en el servicio, por lo tanto no se dejan conectorizados.

Por lo tanto, el número total de empalmes por fusión a realizar de forma concreta es de 3, y puede llegar a ser tantos como usuarios potenciales de demanda de servicio se han concretado en el índice de penetración, particular para cada finca.

Para poder realizar un estudio adecuado de los R.I.T.I.s de cada finca, y así poder determinar la longitud del cableado de acceso, se dividirá el estudio por cada finca objeto.

- **Finca 7**

Esta finca se encuentra dividida en 5 edificios con su portal correspondiente, cada uno de los cuales posee un R.I.T.I. en la planta baja del edificio. Según los datos tomados en la fase de replanteo, el R.I.T.I. que mejor cumple las condiciones descritas en cuanto a optimización de la ubicación, es el R.I.T.I. del portal San Cipriano 73, dado que desde éste las tiradas de cable vertical son las más cortas y es el R.I.T.I. más grande la finca. A continuación se muestra una imagen aérea donde se ubican los portales y el R.I.T.I. de la finca seleccionado.



Figura 129: Red de acceso y R.I.T.I. en finca 7

El cable de acceso TKT discurrirá a través de la canalización de baja tensión tal y como muestra la imagen, entrando en la finca a través de la arqueta ICT de acceso denominada ARQ11. Dicho cable discurrirá a través de bandejas rejibands de telecomunicaciones del edificio instaladas en los garajes y sótanos del edificio, hasta llegar al R.I.T.I. del portal San Cipriano 73. La distancia concreta que debe recorrer el cable de acceso TKT, desde la arqueta de acceso ARQ10 hasta el R.I.T.I. del portal San Cipriano 73 es de 160 metros.

El recorrido del cable que se realiza a través de la planta sótano del edificio y garajes y aparece detallado en el plano **FI07PL01**. El detalle a escala sobre cartografía real de la red de acceso para la finca 7 se encuentra disponible en el plano **RA01PL01** del Anexo I.

• **Finca 8**

Esta finca se encuentra dividida a su vez en dos subfincas, la finca 8-A ubicada en la zona norte y la finca 8-B en la zona sur. Dado que cada una de estas subfincas requiere la instalación de su propio R.I.T.I. con su propio cable de acceso y sus divisores de segunda etapa, se detallarán de forma independiente.

La finca 8-A está constituida por 6 edificios con su portal correspondiente, cada uno de los cuales posee un R.I.T.I. en la planta baja del edificio. Según los datos

tomados en la fase de replanteo, el R.I.T.I. que mejor cumple las condiciones descritas en cuanto a optimización de la ubicación, es el R.I.T.I. del portal San Cipriano 67 portal H, dado que es el que posee mejor acceso desde la canalización de baja tensión.

Por otra parte, la finca 8-B está constituida también por 6 edificios con su portal correspondiente, cada uno de los cuales posee un R.I.T.I. en la planta baja del edificio, siendo éstos. Según los datos tomados en la fase de replanteo, el R.I.T.I. que mejor cumple las condiciones descritas en cuanto a optimización de la ubicación, es el R.I.T.I. del portal San Cipriano 67 portal K, dado que es el que posee mejor acceso desde la canalización de baja tensión, como ocurre en el caso de la finca 8-A. A continuación se muestran las imágenes aéreas donde se ubican los portales y los R.I.T.I.s de la finca 8 seleccionados en cada caso.

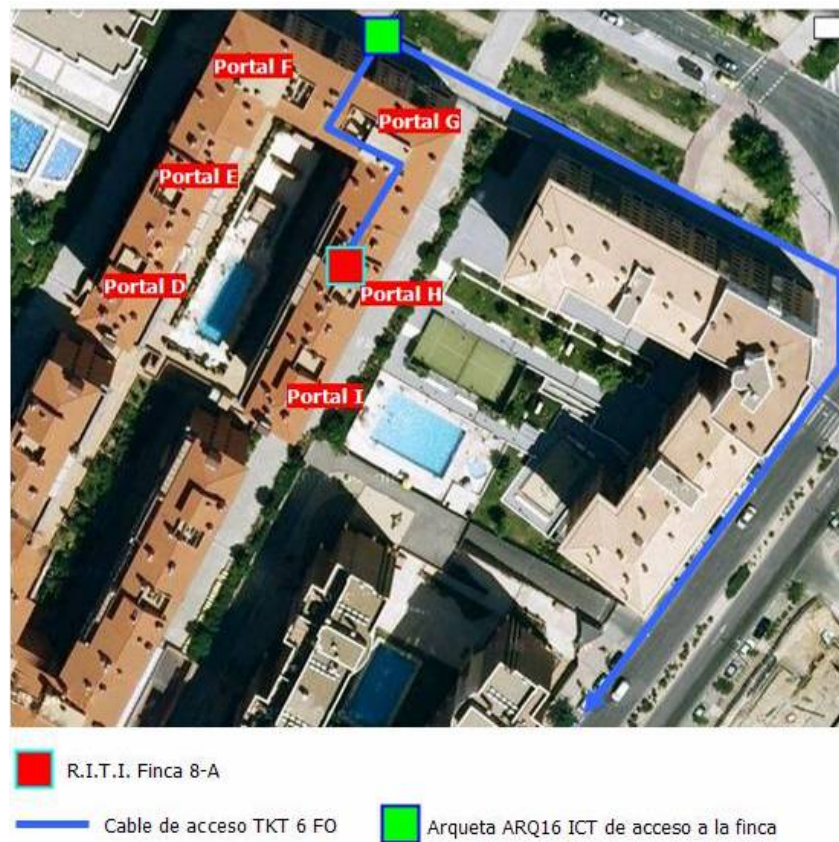


Figura 130: Red de acceso y R.I.T.I. en finca 8-A

El cable de acceso TKT discurrirá a través de la canalización de baja tensión tal y como muestra la imagen, entrando en la finca a través de la arqueta ICT de acceso denominada ARQ16. Dicho cable discurrirá a través de bandejas rejibands de telecomunicaciones del edificio instaladas en los garajes y sótanos del edificio, hasta llegar al R.I.T.I. del portal H. La distancia concreta que debe recorrer el cable de acceso TKT, desde la arqueta de acceso ARQ10 hasta el R.I.T.I. del portal H es de 298 metros.

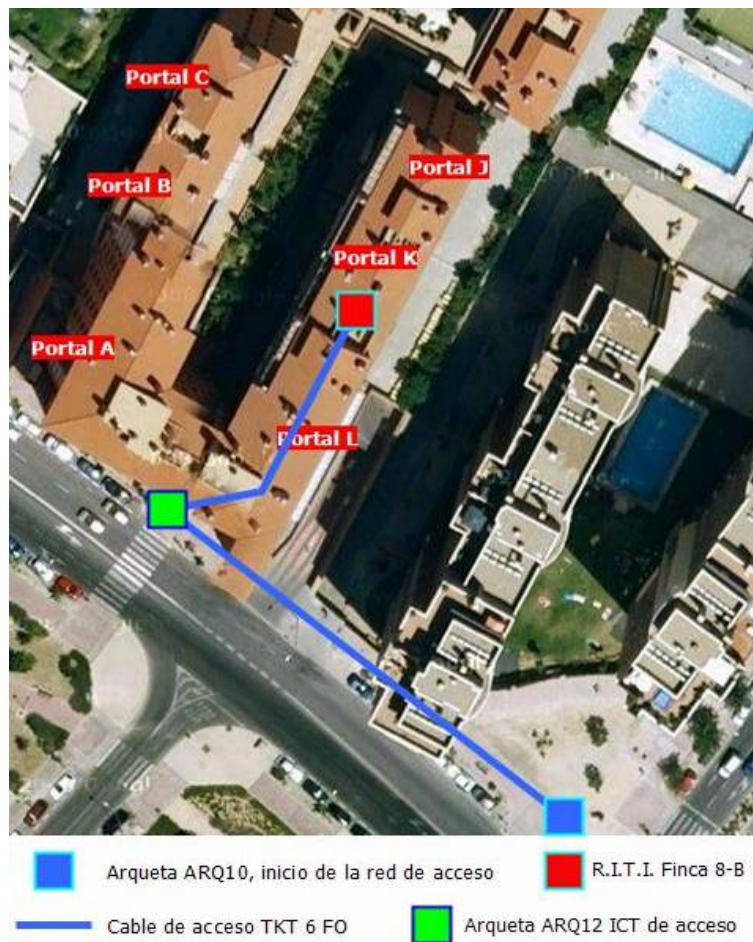


Figura 131: Red de acceso y R.I.T.I. en finca 8-B

El cable de acceso TKT discurrirá a través de la canalización de baja tensión tal y como muestra la imagen, entrando en la finca a través de la arqueta ICT de acceso denominada ARQ12. Dicho cable discurrirá a través de bandejas rejibands de telecomunicaciones del edificio instaladas en los garajes y sótanos del edificio, hasta llegar al R.I.T.I. del portal K. La distancia concreta que debe recorrer el cable de acceso TKT, desde la arqueta de acceso ARQ10 hasta el R.I.T.I. del portal K es de 172 metros.

• **Finca 9**

Esta finca se encuentra dividida en 3 edificios con su portal correspondiente, cada uno de los cuales posee un R.I.T.I. en la planta baja del edificio. Según los datos tomados en la fase de replanteo, el R.I.T.I. que mejor cumple las condiciones descritas en cuanto a optimización de la ubicación, es el R.I.T.I. del portal Gran Vía del Este 4, dado que es el que posee mejor acceso desde la canalización de baja tensión y es el R.I.T.I. más grande la finca. A continuación se muestra una imagen aérea donde se ubican los portales y el R.I.T.I. de la finca seleccionado.



Figura 132: Red de acceso y R.I.T.I. en finca 9

El cable de acceso TKT discurrirá a través de la canalización de baja tensión tal y como muestra la imagen, entrando en la finca a través de la arqueta ICT de acceso denominada ARQ14. Dicho cable discurrirá a través de bandejas rejibands de telecomunicaciones del edificio instaladas en los garajes y sótanos del edificio, hasta llegar al R.I.T.I. del portal Gran Vía del Este 4. La distancia concreta que debe recorrer el cable de acceso TKT, desde la arqueta de acceso ARQ10 hasta el R.I.T.I. del portal Gran Vía del Este 4 es de 234 metros.

• **Finca 10**

Esta finca se encuentra dividida en 8 edificios con su portal correspondiente, cada uno de los cuales posee un R.I.T.I. en la planta baja del edificio. Según los datos tomados en la fase de replanteo, el R.I.T.I. que mejor cumple las condiciones descritas en cuanto a optimización de la ubicación, es el R.I.T.I. del portal Minerva 5, dado que es el que posee mejor acceso desde la canalización de baja tensión y es el R.I.T.I. más grande la finca. A continuación se muestra una imagen aérea donde se ubican los portales y el R.I.T.I. de la finca seleccionado.



Figura 133: Red de acceso y R.I.T.I. en finca 10

El cable de acceso TKT discurrirá a través de la canalización de baja tensión tal y como muestra la imagen, entrando en la finca a través de la arqueta ICT de acceso denominada ARQ17. Dicho cable discurrirá a través de bandejas rejibands de telecomunicaciones del edificio instaladas en los garajes y sótanos del edificio, hasta llegar al R.I.T.I. del portal Gran Vía del Este 4. La distancia concreta que debe recorrer el cable de acceso TKT, desde la arqueta de acceso ARQ10 hasta el R.I.T.I. del portal Gran Vía del Este 4 es de 482 metros.

5.3.3.3. Diseño de las verticales

La última etapa del diseño de la red de acceso, corresponde a las tiradas verticales de fibra desde el R.I.T.I. hasta las viviendas. A la hora de realizar el diseño de esta etapa, es necesario tener en cuenta dos consideraciones de vital importancia:

- Tan sólo será responsabilidad de este diseño terminar los cables en cajas de derivación de acceso a las viviendas, dado que el cableado final hasta la vivienda e instalación de los ONT y rosetas ópticas será responsabilidad del operador por considerarse parte activa de la red.

- El dimensionado del cableado vertical de las viviendas ha de realizarse sobre el 100% de los usuarios, independientemente de si son demandantes de servicio en potencia o no. Es uno de los criterios de diseño impuestos que además, se encuentran en las recomendaciones de diseño FTTH del capítulo 4.

A pesar de que el diseño de las verticales de los edificios es un proceso muy particular de cada finca y portal en estudio, se ha de elaborar un procedimiento de diseño a seguir en todo y cada uno de los emplazamientos implicados.

El procedimiento general de diseño que suele contemplarse en este tipo de proyectos, consiste en tender cables desde el R.I.T.I. elegido hasta las viviendas, subiendo a través de la canalización ICT o canalización *riser* (si la hubiera). Este tipo de canalización, cuenta con trampillas o accesos en cada planta del edificio, generalmente situadas en las escaleras de acceso a las viviendas. En dichos accesos se realiza la instalación de unas cajas denominadas cajas de derivación por planta, que permiten realizar el sangrado del cable vertical. Este tendido se denomina tendido primario [46].

El sangrado del cable por caja de derivación, consiste en cortar aquellas fibras dedicadas a los usuarios de las viviendas existentes en dicha planta. Si un usuario decide darse de alta en el servicio, es necesario realizar dos operaciones:

- Instalar el ONT correspondiente, en unas cajas denominadas PTRO, o punto terminal de red óptico.
- Tender un cable de fibra óptica monofibra entre la caja de derivación por planta, y el PTRO de la vivienda que será el que le permita disfrutar de los servicios contratados. Este cable se denomina tendido secundario.
- Realizar un empalme mecánico entre el cable dedicado a dicha vivienda, ubicado en la caja de derivación, y el nuevo cable de tendido secundario, es decir, la fibra de acceso a la vivienda.
- Realizar un empalme mecánico entre el cable de acceso a la vivienda, y el PTRO de la vivienda.

Además de estos dos empalmes, es necesario realizar un empalme en la CTO (caja terminal óptica) del R.I.T.I. o MDU en este caso, entre la fibra del cable *riser* de la vivienda que demanda el servicio, y la salida del divisor de segunda etapa correspondiente al operador que prestará el servicio. Por ejemplo, si un usuario de la finca 8 que vive en el portal D planta 2 puerta A, desea darse de alta en el servicio, es necesario realizar los siguientes empalmes y procesos, tal y como se muestra en la figura 134:

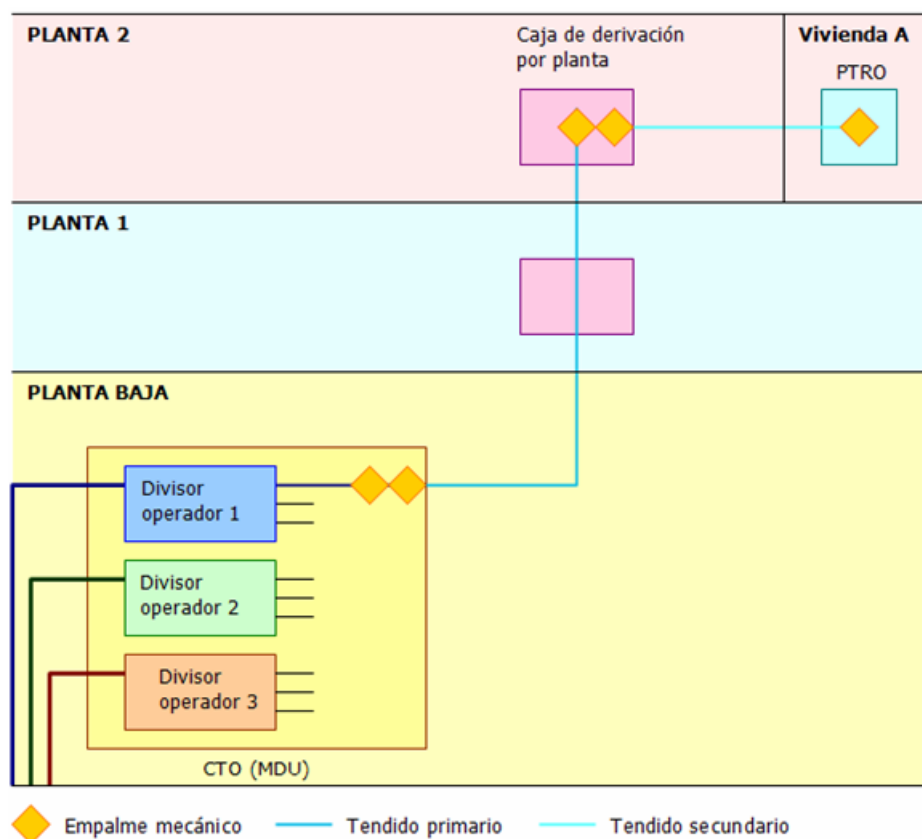


Figura 134: *Diseño habitual del tendido vertical*

En estos diseños se reserva un tubo de fibra para cada vivienda particular, de tal forma que suben por la vertical, al menos, tantas fibras como viviendas para garantizar el servicio a cualquier usuario del edificio.

A lo largo del proceso de alta de un usuario en el servicio, se contabilizan un total de 3 empalmes mecánicos, tal y como se muestra en la figura anterior. Además, este procedimiento lleva asociado un coste de despliegue e instalación elevado, puesto que se ha de realizar el sangrado, y cortado de todas las fibras que suben por la vertical, independientemente de si los usuarios demandan servicio o no.

En el diseño de las verticales del edificio en este proyecto, incluyendo como verticales el tendido primario y el tendido secundario, se propone un método innovador en el campo de los tendidos verticales, que intentará mejorar los aspectos negativos asociados al método de tendido explicado anteriormente.

La metodología consiste en utilizar cables *riser* especialmente preparados para el tendido vertical, dado su ligereza y facilidad de curvatura con mínimo impacto sobre la señal transportada. Se deben instalar tantos cables *riser* como edificios dependientes de dicho R.I.T.I. existan. El número de fibras de cada cable *riser*, dependerá del número de viviendas que posea el edificio en cuestión, y quedará detallado en los apartados concretos de cada finca de estudio.

Los cables *riser* parten de la MDU instalada en el R.I.T.I., en dirección a las canalizaciones ICT de cada edificio dependiente de dicho R.I.T.I., de tal forma que un

cable *riser* debe alimentar a un edificio o portal concreto. El tendido del cable se realizará a través de los sótanos y garajes del edificio, hasta alcanzar la canalización vertical ICT. En este punto, se realizará el tendido vertical hasta llegar a la última planta donde se dejará una coca de cable o balona sobrante de unos 20 metros enrollada, en la trampilla o caja de acceso de la planta. El hecho de dejar en la última planta cierta cantidad de cable *riser* enrollado se justifica según la siguiente metodología de trabajo:

- Cuando un usuario desea darse de alta en el sistema, el técnico encargado del alta (comúnmente denominado altero), debe subir a la última planta del edificio, donde se encuentra el sobrante de cable *riser*, concretamente en la caja de acceso a la ICT.
- El altero realizará un corte sobre la cubierta del cable *riser* a modo de ventana, denominada ventana ojival. El cable *riser* posee una cubierta específica para poder realizar este tipo de cortes sin dañar las fibras de su interior.
- El corte realizado, deberá protegerse con algún elemento de protección destinado a ello, generalmente un pequeño registro que se instala longitudinalmente sobre la fibra y que alberga la ventana ojival para protegerla del exterior.
- Una vez realizado el corte sobre la cubierta, el técnico debe localizar la fibra dedicada al usuario que desea el alta, y extraerla por la parte del sobrante.
- Cuando ya haya extraído la fibra por la parte del sobrante, deberá cortar la fibra, si el usuario demandante se encuentra en las plantas más bajas del edificio, o dejarla si el usuario se encuentra en plantas próximas a la última planta.
- A continuación, el altero deberá bajar a la planta donde se encuentra el usuario demandante del servicio. Desde la trampilla de acceso a la ICT, realizará un nuevo corte en el cable *riser* que se encuentra tendido, y por lo tanto otra ventana ojival.
- En este caso, el corte queda protegido por la caja de derivación por planta instalada en el acceso a la ICT de la planta. Esta caja servirá para dotar de protección a la ventana ojival, y para albergar fibra.
- Una vez realizado el corte sobre la cubierta, el técnico debe localizar nuevamente la fibra dedicada al usuario que desea el alta, y que cortó extrajo en la última planta del edificio.
- A continuación se debe extraer la fibra, respetando el radio de curvatura de la fibra para evitar su deterioro o rotura. Concretamente se debe extraer toda la fibra procedente de las plantas superiores, es decir, el tramo comprendido entre el corte realizado en la planta superior, y la planta donde se encuentra el técnico.

- Una vez extraída la fibra, existe longitud suficiente gracias a su almacenado en la planta superior para poder tenderla hasta el PTRO de la vivienda.
- Será allí, en el propio PTRO donde se realice una conexión mediante empalme mecánico.

Con este método de diseño de las verticales, el número de empalmes a realizar entre la MDU del R.I.T.I. y la PTRO de la vivienda se reduce a 2, lo que intrínsecamente implica menos pérdidas de enlace, y una mayor calidad de la señal hasta la vivienda. Además, se eliminan fuertes costes del despliegue inicial de la red, dado que no es necesario realizar el sangrado de todas las fibras del cable *riser*, sino solo aquellas de los usuarios que demandan servicio. Por otra parte, el hecho de sólo extraer las fibras activas, supone que el resto de fibras del cable, que queda sin utilizar se encuentren más resguardadas dentro del propio cable, y no en punta dentro de la caja de derivación, como en el método tradicional.

En conclusión, este método implica un menor coste de despliegue de la red, menos pérdidas de transmisión, y mayor protección y seguridad del sistema. A continuación se muestra gráficamente en la figura 135 el diseño de las verticales según el método propuesto.

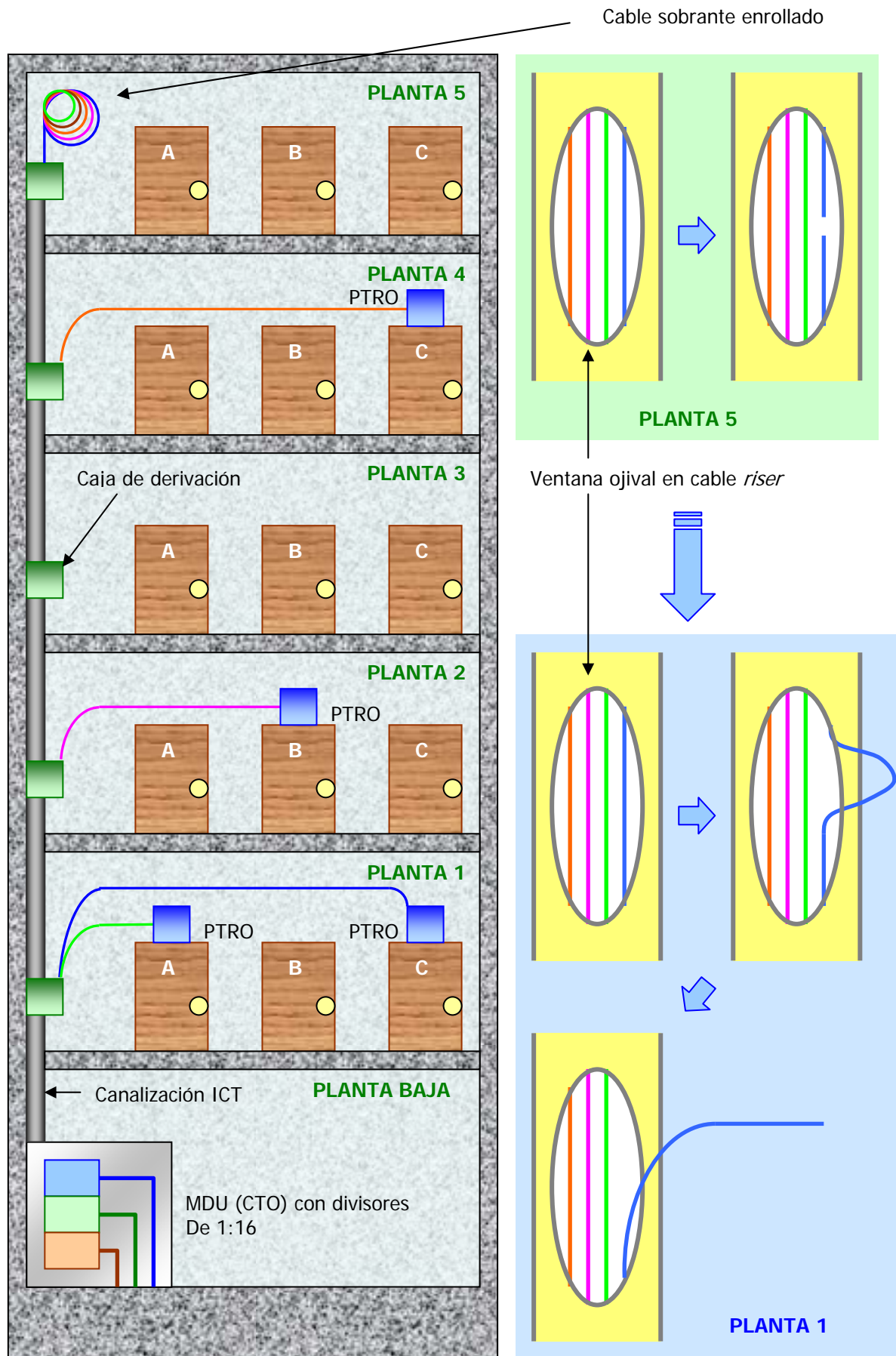


Figura 135: Diseño del tendido vertical propuesto en el proyecto

Para llevar a cabo el tendido vertical, se ha seleccionado cable *riser* marca Prysmian modelo VertiCasa CasaLight, de 24 FO y 48 FO, en función del número de usuarios del edificio. Este cable es idóneo para instalaciones verticales *riser*, por su bajo peso. El cable irá atravesando a lo largo de las verticales las cajas o trampillas de cada planta, donde se instalarán las cajas de derivación. Para este tipo de cajas se ha seleccionado cajas de derivación y almacenaje marca Prysmian modelo Verticasa RiserBox con capacidad de almacenaje y empalme de hasta 12 fibras.

Las cajas de derivación serán las encargadas de proteger la ventana ojival de cada planta, así como de almacenar las fibras extraídas de los usuarios hasta que se produzca el alta efectiva por parte del operador. Cuando se produce el alta de un usuario, el técnico altero realizará la apertura de la ventana ojival en la planta correspondiente, extrayendo la fibra determinada del usuario. Sin embargo, una vez realizada la ventana puede ser de gran ayuda extraer el resto de fibras correspondiente al resto de usuarios de la planta, dado que facilitará el alta de estos usuarios en un futuro.

En cuanto a la protección de la ventana ojival en la última planta, se ha seleccionado el elemento de protección marca Prysmian modelo Verticasa ProtectionCover de PVC. Esta caja se adapta longitudinalmente a la fibra, permitiendo su apertura fácilmente en caso de necesitar el acceso nuevamente a la ventana ojival.

Una vez definida la metodología de diseño del tendido vertical a aplicar en el proyecto, se detallará este diseño aplicado a cada finca y portal en particular, con las unidades y tipología de cada elemento pasivo a utilizar.

• **Finca 7**

Atendiendo a la información de la figura 119 del apartado anterior, la finca 7 posee un R.I.T.I. ubicado en la planta baja del portal San Cipriano 73. Puesto que está constituida por 5 edificios, será necesario la instalación de 5 cables *riser*, de tal forma cada uno de ellos prestará servicio a un edificio distinto. Teniendo en cuenta el número de viviendas de cada portal, los cables *riser* de los portales 73, 75 y 10, serán de 24 fibras, mientras que los cables *riser* de los portales 77 y 12 serán de 48 fibras. La longitud del cable en cada uno de los portales, el número de cajas de derivación por planta, y el número de elementos de protección de ventana ojival, aparecen resumidos en la siguiente tabla:

Portal	Longitud del cable vertical	Cajas de derivación	Protector ventana
73	64 m	7	1
75	110 m	7	1
77	125 m	10	1
10	129 m	7	1
12	140 m	10	1

Figura 136: Longitud del cableado vertical en finca 7

• **Finca 8**

Atendiendo a la información de la figura 119 del apartado anterior, la finca 8 posee dos R.I.T.I.s ubicado en la planta baja de los portales San Cipriano 67-H y San Cipriano 67-K. Puesto que la finca 8 está constituida por 12 edificios, será necesario la instalación de 12 cables *riser*, de tal forma cada uno de ellos prestará servicio a un edificio distinto. Teniendo en cuenta el número de viviendas de cada portal, los cables *riser* de los portales A, B, C, D, E, H, I J, y K serán de 24 fibras, mientras que los cables *riser* de los portales F, G y L serán de 48 fibras. La longitud del cable en cada uno de los portales, el número de cajas de derivación por planta, y el número de elementos de protección de ventana ojival, aparecen resumidos en la siguiente tabla:

Portal	Longitud del cable vertical	Cajas de derivación	Protector ventana
A	62 m	7	1
B	123 m	6	1
C	134 m	6	1
D	156 m	6	1
E	140 m	6	1
F	127 m	6	1
G	98 m	6	1
H	65 m	6	1
I	84 m	6	1
J	78 m	6	1
K	65 m	6	1
L	92 m	7	1

Figura 137: Longitud del cableado vertical en finca 8

• **Finca 9**

Atendiendo a la información de la figura 119 del apartado anterior, la finca 9 posee un R.I.T.I. ubicado en la planta baja del portal Villablanca 70. Puesto que la finca 9 está constituida por 3 edificios, será necesario la instalación de 3 cables *riser*, de tal forma cada uno de ellos prestará servicio a un edificio distinto. Teniendo en cuenta el número de viviendas de cada portal, los cables *riser* de todos los portales serán de 48 fibras. La longitud del cable en cada uno de los portales, el número de cajas de derivación por planta, y el número de elementos de protección de ventana ojival, aparecen resumidos en la siguiente tabla:

Portal	Longitud del cable vertical	Cajas de derivación	Protector ventana
2	98 m	8	1
4	67 m	7	1
70	124 m	6	1

Figura 138: Longitud del cableado vertical en finca 9

• **Finca 10**

Atendiendo a la información de la figura 119 del apartado anterior, la finca 10 posee un R.I.T.I. ubicado en la planta baja del portal Minerva 5. Puesto que la finca 10 está constituida por 8 edificios, será necesario la instalación de 8 cables *riser*, de tal

forma cada uno de ellos prestará servicio a un edificio distinto. Teniendo en cuenta el número de viviendas de cada portal, los cables *riser* de los portales 1, 5, 7, 13, 61 y 63 serán de 24 fibras, mientras que los cables *riser* de los portales 3 y 15 serán de 48 fibras. La longitud del cable en cada uno de los portales, el número de cajas de derivación por planta, y el número de elementos de protección de ventana ojival, aparecen resumidos en la siguiente tabla:

Portal	Longitud del cable vertical	Cajas de derivación	Protector ventana
1	104 m	6	1
3	72 m	8	1
5	61 m	6	1
7	78 m	6	1
13	166 m	6	1
15	180 m	9	1
61	253 m	6	1
63	240 m	7	1

Figura 139: Longitud del cableado vertical en finca 10

5.3.4. Diseño de la red troncal urbana

La red urbana incluye la parte de la red encargada de la distribución general de la señal a varias redes de acceso con sus correspondientes nodos. El caso objeto de estudio es especial, dado que la propia red urbana puede ser considerada como red de acceso al sólo existir una. De ahí que la denominación de la central sea también central de acceso.

Siguiendo un patrón de diseño estricto, la central urbana debe distribuir la señal a través de la red urbana hasta distintas centrales de acceso, donde éstas distribuirán su señal correspondiente a través de la red de acceso asociada hasta las viviendas. Sin embargo, el hecho de que la red troncal estuviese ya tendida y en funcionamiento dando servicio a otras áreas de la zona y que esta red tuviese una central de conmutación a lo largo de su recorrido, la convierte a su vez en red de acceso a las viviendas. No obstante, dada su longitud e importancia, se tratará de forma independiente a la zona de acceso a las viviendas, considerándose ésta como la zona perimetral de las fincas objeto, tal y como se muestra en el plano **RA01PL01** del Anexo I.

La red urbana que ocupa en este proyecto está constituida por un cable de 64 FO PKP monomodo monofibra formada por 8 tubos de 8 fibras cada uno. De estas 64 fibras, tan sólo se encuentran activas 4 fibras según el propietario de la red, por lo que se dispone de fibra óptica libre suficiente para prestar servicio al índice de penetración estimado, además de para futuras ampliaciones de red.

Para economizar recursos, se realiza un diseño de la red monofibra bidireccional, es decir, se multiplexa bajo la misma fibra el canal de datos ascendente y el descendente, según las longitudes de onda correspondiente a los servicios del P-OLT y V-OLT especificadas en el estándar GPON ITU-T G.984 detallado en el capítulo 2 apartado 2.5.4 *Estándar GPON: ITU-T G.984.x del presente proyecto*. La multiplexación se realizará a través de un equipo denominado M-OLT encargado de dicha funcionalidad y cuyo diseño e instalación corresponde a la parte activa de los operadores, no siendo objeto por tanto de este diseño.

De esta forma, la red urbana debe alimentar los divisores de primera etapa de la red de acceso, que concretamente eran 6, dos por operador. Por lo tanto, tan sólo es necesario ocupar 6 fibras ópticas de la red troncal para dar el servicio FTTH a las fincas de estudio, dos fibras dedicada al tráfico de cada operador, tal y como se ha especificado en el apartado anterior, quedando libres otras 54 para futuras ampliaciones de servicio.

El origen de la red urbana se encuentra en la central de acceso, más concretamente, en el punto donde se producirá la segregación de las fibras que servirán de infraestructura a los operadores para dar el servicio final. El final de la red urbana queda determinado por el punto de confluencia con la red de acceso determinada en el anteproyecto, siendo éste punto la arqueta ARQ10 ubicada en los planos **RU01PL01** y **RA01PL01** del Anexo I. La trayectoria concreta de las 6 fibras ópticas que constituyen la red urbana del diseño a través de la canalización existente, se encuentra disponible en el plano de red **RU01PL01**, y sus particularidades de instalación se detallarán en el apartado 5.5 *Instalación del proyecto*.

La ruta entre el punto de inicio y el punto de fin de la red supone una distancia de 985 metros según los datos tomados en el acta de replanteo. Sin embargo, será necesario certificar que esta distancia es lo suficientemente pequeña como para no necesitar elementos activos de amplificación (amplificadores ópticos), o si por el contrario es necesario instalarlos, y con qué periodicidad. Para ello se llevará a cabo el cálculo del balance óptico de la red, que se detallará en el apartado 5.3.6 *Balance óptico de la red*.

5.3.5. Diseño de la central de acceso

La central de acceso supone otro de los emplazamientos clave del diseño, puesto que su función es ser cabecera de la red. En la central se situarán los elementos activos de la red, así como los bastidores de distribución de fibra procedentes de la red urbana. La red debe estar preparada para la instalación de hasta tres OLT, cada uno perteneciente a un operador distinto. Esto implica intrínsecamente el despliegue en paralelo de tres redes PON, una para cada operador pero multiplexando sus servicios a través del mismo canal físico, y por lo tanto, a través de las mismas fibras.

Tal y como se ha podido comprobar en la etapa de replanteo, a la central llega un cable de fibra troncal (de red urbana) de 64 FO PKP, cuya propietaria es una empresa de telecomunicaciones y que servirá para el despliegue de la red de acceso en el proyecto de manera simultánea a la red urbana. De estas 64 fibras, 4 se encuentran con servicio activo, y otras 6 fibras son las que constituyen las 3 redes PON en paralelo, dedicando dos fibras por cada una de ellas, y por tanto, por cada operador.

Para poder prestar el servicio a través de la red, es necesario que la fibra entrante en la central sea segregada y distribuida a los OLT de cada operador. En este caso, el hecho de desplegar tres redes PON en paralelo, cada una de ellas constituida por dos fibras ópticas, obliga a parchear 6 fibras ópticas (el enlace es monofibra) del cable de red urbana que darán servicio FTTH a las fincas objeto. Según información del replanteo, existe espacio suficiente para la instalación de los nodos OLT de cada operador, y de un bastidor de reparto de fibra.

Según la *Resolución de 8 de mayo de 2008 (MTZ 2008/626)* de la CMT [53] por la que los operadores de cable están obligados a compartir su red de fibra óptica a otros operadores, ya sean operadores neutros o de servicio directo, el propietario de la red no posee la obligación de ceder el equipamiento pasivo y activo de la red final, sino tan sólo la red troncal y el espacio físico de ubicación de terminación de red, tanto activo como pasivo.

En virtud de lo anterior, y teniendo en cuenta que no es objeto del proyecto el diseño e instalación de la parte activa de la red, es necesario tan sólo la instalación de un nuevo armario repartidor de fibra óptica tipo OMX, para terminación, empalme y módulos de valor añadido o VAM (*value added modules*), tales como divisores, WDMs, etc. Dada la importancia y relevancia de este bastidor, es necesario que este elemento tenga la capacidad suficiente como para albergar una gran cantidad de terminaciones de fibra, puesto que puede dar servicio a gran número de usuarios finales.

Independientemente del número de fincas incluidas en este proyecto, el resto de fincas de la zona no poseen infraestructura FTTH, por lo que es muy probable que en un futuro próximo y en base a realizar un despliegue de red masivo FTTH, este bastidor pueda ser el elemento pasivo de cabecera de la red, y debe estar preparado para ello.

Por ello, se decide instalar un armario repartidor OMX para fibra óptica del fabricante ADC-Krone modelo MX6-TSF6030 de dimensiones 2200 x 600 x 300 mm, dotado con 10 espacios para instalación de módulos que se describen más adelante.

La conectividad de la fibra al repartidor OMX se realizará a través de latiguillos de parcheo monofibra de baja sensibilidad a curvaturas y con terminación en conector SC/APC. La decisión de utilizar conectores SC/APC atiende a la necesidad de utilizar un tipo de conector válido para densidad de datos elevada sobre cables monofibra (SC), y a la vez con un pulido en su férula o ferrule de última tecnología inclinado 8° (APC), capaz de dotar al conector con un empalme firme y a la vez con menos pérdidas de reflexión (inferiores a 60 dB).

Una vez decidido el tipo de conector a utilizar en los latiguillos de parcheo, es necesario completar el equipamiento del bastidor OMX mediante un módulo de terminación preconectorizado con 64 conectorizaciones SC/APC instalado en uno de los lados del bastidor, marca ADC-Krone modelo MX6-PMBLR4080-ESP. Este elemento permitirá por un lado conectorizar la fibra troncal con el repartidor OMX a través de latiguillos de parcheo comentados en el párrafo anterior; y por otro conectorizar el bastidor OMX con el equipo terminal OLT del operador a través de cordones de conexión, y que será responsabilidad del operador final. Tan sólo será necesario la conexión de 6 latiguillos, por lo que el resto de conectorizaciones quedan a disposición de futuras ampliaciones de la red. Este elemento ocupa un espacio de uno de los laterales del armario.

Además, para poder realizar los empalmes correspondientes entre la fibra troncal y el latiguillo de parcheo del bastidor OMX, es necesario dotar al armario de un módulo de empalme con capacidad para 24 bandejas de empalme (hasta 16 empalmes por bandeja), marca ADC-Krone modelo MX6-24SPNL-R. Este elemento ocupa 2 espacios de un lateral del bastidor OMX.

A estos módulos es necesario añadirles las bandejas de empalme donde se realizará la conexión final entre el latiguillo de parcheo y la fibra tronca. Dado que son 3 redes PON en paralelo, cada una de ellas constituida por dos fibras, y la conexión se realizará a través de latiguillos monofibra, será necesario realizar 6 empalmes, 2 por cada red PON. Por ello tan sólo se debe dotar al módulo de empalmes con una bandeja de empalme marca ADC-Krone modelo FST-FRS16-HS que permite realizar y albergar hasta 16 empalmes de fibra óptica por fusión. El resto de espacios disponibles para instalación de nuevas bandejas queda a disposición de futuras ampliaciones de la red.

Para poder albergar las fibras sobrantes, así como los latiguillos de conexión, es necesario instalar un módulo de almacenamiento interno para enrollarlas y colocarlas, marca ADC-Krone modelo MX6-JSM0000. Este módulo ocupa un espacio del bastidor OMX.

En la mayoría de los diseños de redes FTTH, es muy común instalar módulos VAM para la ubicación de los divisores ópticos de primera etapa en el propio bastidor OMX, quedando organizado en cabecera tanto el equipamiento activo, como la red terminal pasiva incluyendo la primera etapa de división. Sin embargo, tal y como se ha comentado en el apartado 5.3.3. *Diseño de la red de acceso* en este diseño se ha optado por la instalación de divisores de primera etapa en arquetas próximas a las fincas, hecho que introduce una serie de ventajas a la red, comentadas también en dicho apartado.

Se puede recoger la información anterior de manera resumida según el esquema de la figura 140, en el cuál se muestran de forma simbólica los elementos propios del diseño de la central.

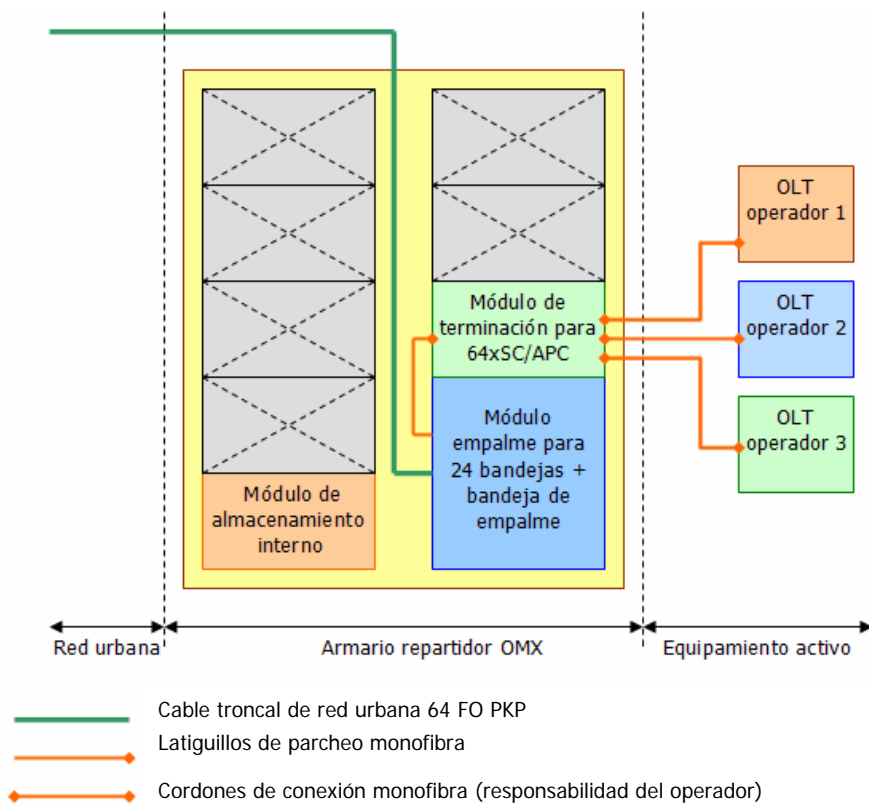


Figura 140: *Diseño de la central de acceso*

El procedimiento y ubicación final de los elementos quedará detallado y especificado en el apartado 5.5 *Instalación del proyecto* así como en el plano CA01PL01 del Anexo I del proyecto.

5.3.6. Balance óptico de la red

El hecho de que en este proyecto no se incluya diseño activo, no implica que no se haya de tener en cuenta el futuro equipamiento de los operadores para prestar el servicio. Así pues, es necesario realizar una estimación sobre la potencia óptica de los equipos de transmisión que permita elaborar un balance óptico de pérdidas de la red urbana y poder establecer la longitud máxima del enlace.

Antes de realizar del balance óptico, es necesario previamente establecer los puntos de origen y fin del enlace. Para ello, se establecerán dos balances ópticos de red:

- El balance óptico de la red urbana. Este tramo está comprendido entre el OLT del operador ubicado en la central de acceso, y la caja de empalme ubicada en la arqueta ARQ10 de confluencia entre la red urbana y la red de acceso.
- El balance óptico de la red de acceso. Este tramo está comprendido entre la caja de empalme ubicada en la arqueta ARQ10, y el ONT del usuario, ubicado en el PTRO de cada vivienda.

5.3.6.1. Balance óptico de la red urbana

Para el cálculo de un balance óptico, y en consecuencia de la longitud máxima del enlace, es necesario conocer una serie de parámetros que son los que se enumeran a continuación. La longitud máxima viene dada por la siguiente expresión, tal y como se especificó en el capítulo 4:

$$L_{max} = \frac{P_{op} - a \cdot C_a - b \cdot S_a - n}{F_a} \quad (117)$$

donde:

- L_{max} es la longitud máxima de la fibra en km
- P_{op} es el margen de potencia máxima para el sistema opto-eléctrico en dB. El margen de potencia, viene dado por la relación existente entre la potencia óptica del transmisor, y la sensibilidad del receptor, expresada en unidades logarítmicas: $P_{op} \text{ (dB)} = P_{TX} - S_{RX}$
- a es el número de conectores de empalme (dos conectores corresponden a una unión)
- C_a es la atenuación media de conector en dB/conector

- b es el número de empalmes de fibra
- S_a es la atenuación media de empalme de fibra en dB/empalme
- n es el margen de envejecimiento, ratio de encendido-apagado, cambios de temperatura y otros parámetros que inciden en la atenuación de la señal
- F_a es la atenuación de la fibra en dB/km

La potencia máxima para el sistema se desconoce, dado que el diseño de los emisores y receptores ópticos no son competencia del diseño del proyecto. Sin embargo, se puede establecer un margen de operación mínima de estos equipos, siendo éste el más restrictivo en cuanto a potencia de emisión se refiere. El estándar GPON ITU-T G.984 [16] establece una clasificación de los láseres de los equipos activos en función de las potencias de transmisión del OLT y de la sensibilidad mínima del receptor OLT, siendo éstas:

Tipo de láser	Potencia mínima OLT (transmisión)	Sensibilidad mínima del ONT (recepción)
A	-4 dBm	-25 dBm
B	+1 dBm	-27 dBm
C	+5 dBm	-26 dBm

Figura 141: Diseño de la central de acceso

El caso más restrictivo es la utilización de equipos OLT y ONT tipo A, con una potencia de emisión de -4 dBm y sensibilidad de recepción de -25 dBm respectivamente. La atenuación máxima soportada por un enlace tipo A, viene determinada por la diferencia entre ambas potencias, siendo por tanto de 21 dB, y por tanto las pérdidas del sistema no deben superar esta cifra. La potencia mínima del transmisor es de -4 dBm, o lo que es lo mismo:

$$\text{Potencia}_{\text{OLT}} = -4\text{dBm};$$

$$\text{Potencia}_{\text{OLT}} = 10^{\frac{-4}{10}} = 0.398 \approx 0.4 \text{ mW};$$

$$\text{Sensibilidad}_{\text{ONT}} = -25\text{dBm}; \quad (121)$$

$$\text{Sensibilidad}_{\text{ONT}} = 10^{\frac{-25}{10}} = 0.398 = 3.16 \cdot 10^{-3} \text{ mW}$$

$$\text{Margen}_{\text{potencia}} = \frac{3.16 \cdot 10^{-3}}{0.4} = 7.9$$

Por lo tanto, el margen de potencia óptica operativa para el sistema es de 21 dB, o lo que es lo mismo $P_{op} = 7.9$.

El número de conectores de cada fibra de red PON viene dado por el número de conectores existentes en cada etapa de la red. En la etapa previa, es decir, desde el OLT hasta la primera etapa de divisores, el número de conectores SC/APC existentes es de 4, siendo éstos:

- Dos conectores del cordón de conexión entre el OLT y el bastidor OMX, no instalados en este diseño, pero imputables como pérdidas globales del sistema, situados en la central.
- Un conector del latiguillo de conexión entre el bastidor OMX y la fibra troncal de red urbana, situado en la central.
- Un conector del latiguillo de conexión entre el divisor de primera etapa y la fibra troncal de red urbana, situado en la arqueta ARQ10.

Las pérdidas medias de inserción para los conectores SC/APC de ADC-Krone es de 0.25 dB [44] como máximo, por lo tanto el valor máximo de pérdidas introducidas por los conectores es de:

$$\text{Pérdidas}_{\text{conectores}} = 0.25 \cdot 4 = 1 \text{ dB} \quad (122)$$

En cuanto al número de empalmes de cada red PON, lo primero es determinar el tipo de empalme a realizar en la red. Dado que los empalmes a realizar se encuentran en un punto de la red crítico (al ser la red troncal), se debe utilizar un empalme por fusión, que es el que introduce menos pérdidas en el sistema y además, es más fiable y duradero. Hay que tener en cuenta que se van a llevar a cabo un gran número de empalmes a lo largo de la red FTTH, y cuanto menor sean las pérdidas introducidas por cada uno de éstos, menor será el balance total de pérdidas del sistema.

El número de empalmes por fusión que se van a llevar a cabo a lo largo de esta etapa de la red son 2, siendo éstos:

- Un empalme por fusión entre el latiguillo de conexión procedente del bastidor OMX y la fibra troncal de red urbana, situado en la central.
- Un empalme por fusión entre el latiguillo de conexión procedente del divisor de primera etapa y la fibra troncal de red urbana, situado en la arqueta ARQ10.

Las pérdidas medias de los empalmes por fusión es de 0.1 dB como máximo [6], por lo tanto el valor máximo de pérdidas introducidas por los conectores es de:

$$\text{Pérdidas}_{\text{empalmes}} = 0.1 \cdot 2 = 0.2 \text{ dB} \quad (123)$$

También es necesario dimensionar el parámetro de margen de envejecimiento y variaciones de temperatura, cuyo valor típico analítico es de 1.5 dB [46]. Este valor es muy estimativo y generalmente está recomendado por los principales fabricantes y suministradores de fibra óptica. Luego $n = 1.5 \text{ dB}$.

Por último es necesario conocer el dato de atenuación de la fibra óptica. Puesto que el sistema tiene prevista una operativa en el rango de longitudes de onda

comprendidas entre la 2ª y 5ª ventana, según el estándar GPON ITU-T G.984 [16], el sistema funcionará en canal de bajada en la denominada 5ª ventana, el canal de subida funcionará en 2ª ventana, y el video en subida funcionará en 3ª ventana. Por lo tanto, es imprescindible realizar un estudio de los tres posibles casos, y tan sólo operar en la fórmula del balance con el más restrictivo de los tres.

Para el cable en cuestión de 64 FO monomodo PKP de marca DRAKA modelo CDS-046 estandarizado según G.652.D suministrado por el propietario, posee los siguientes valores de atenuación para las longitudes de onda de trabajo siguientes [55]:

- Atenuación para 1310 nm (canal subida): 0.35 dB/km.
- Atenuación para 1480 nm (canal bajada): 0.22 dB/km.
- Atenuación para 1550 nm (canal subida video): 0.21 dB/km.

Puesto que el despliegue es monofibra, es decir, bajo el mismo cable se transfiere la información de los tres canales anteriores, es necesario escoger la condición de atenuación más restrictiva de los tres casos anteriores, siendo de 0.35 dB/km.

Con todos los datos calculados, ya se puede aplicar la ecuación (117) correspondiente al cálculo de longitud máxima del enlace óptico. Si se asignan los datos calculados a los parámetros de la ecuación, obtendríamos:

- $P_{op} = 21$ dB
- $a = 4$ conectores
- $C_a = 0.25$ dB/conector
- $b = 2$ empalmes
- $S_a = 0.1$ dB/empalme
- $n = 1.5$ dB
- $F_a = 0.35$ dB/km

$$L_{max} = \frac{P_{op} - a \cdot C_a - b \cdot S_a - n}{F_a} = \frac{21 - 1 - 0.2 - 1.5}{0.35} = 52,28 \text{ km} \quad (124)$$

Por lo tanto, la longitud máxima del enlace para la etapa previa a la primera etapa de división, es de 52.28 km de distancia. Teniendo en cuenta que la longitud de la red urbana comprendida en el proyecto entre el OLT del operador ubicado en la central y la arqueta ARQ10 de la red de acceso es de 985 m, no es necesario la instalación de amplificadores ópticos en el sistema. De hecho, el cálculo del balance óptico del enlace corresponde al numerador de la ecuación (124), siendo éste:

$$Balance = P_{op} - a \cdot C_a - b \cdot S_a - n = 21 - 1 - 0.2 - 1.5 = 18,3 \text{ dB} \quad (125)$$

por lo que la pérdida en el margen óptico del sistema tan sólo es de 2.7 dB en el tramo correspondiente a la red urbana. Además, también se puede calcular el balance óptico por distancia (985 km) del enlace, mediante la siguiente ecuación:

$$Balance / distancia = \frac{P_{op} - a \cdot C_a - b \cdot S_a - n}{L_{sistema}} = \frac{21 - 1 - 0.2 - 1.5}{0.985} = 18,57 \text{ dB/km} \quad (126)$$

A tenor de los resultados obtenidos, se demuestra que el valor de potencia del sistema a lo largo de la ruta de enlace de red urbana es muy bueno, dado que partiendo de un margen de potencia óptica operativa de 21 dB, la potencia del sistema se decrementa hasta la primera etapa de división:

$$Pérdidas_{1^{\circ}etapa} = 2.1 \text{ dB} - 18,3 \text{ dB} = 2.7 \text{ dB} \quad (127)$$

por lo tanto, la pérdida es comparativamente baja con la capacidad de la que podría soportar el sistema en situación extrema.

5.3.6.2. Balance óptico de la red de acceso

Para poder calcular el balance óptico de la segunda etapa de la red, es necesario partir del margen óptico resultante una vez que la señal atraviesa los divisores de primera etapa. En este caso, el margen efectivo de señal viene determinado por el resultado del balance óptico de la red urbana, siendo éste $P_{op} = 18,3 \text{ dB}$.

Siguiendo el patrón de cálculo utilizado en el balance óptico de la red troncal urbana, es necesario calcular el número de empalmes de este tramo, el número de conectores y la atenuación introducida por el cable y por los elementos pasivos anteriores.

El número de conectores de cada fibra de red PON en esta etapa, comprendida entre el divisor de primera etapa ubicado en la caja de empalme de la arqueta ARQ10, y el ONT del usuario final ubicado en la caja PTRO de la vivienda, es el siguiente:

- Un conector del latiguillo de conexión entre el divisor de segunda etapa y la fibra *riser* de la red de acceso vertical, situado en el armario MDU del R.I.T.I.
- Un conector del latiguillo de conexión entre la fibra *riser* de acceso a la vivienda y el ONT del usuario, situado en el PTRO de la vivienda.

Por lo tanto, el número de conectores SC/APC existentes es de 2. Las pérdidas medias de inserción para los conectores SC/APC de ADC-Krone es de 0.25 dB como máximo, por lo tanto el valor máximo de pérdidas introducidas por los conectores es de:

$$Pérdidas_{conectores} = 0.25 \cdot 2 = 0.5 \text{ dB} \quad (128)$$

En cuanto al número de empalmes de cada fibra de red PON, lo primero es determinar el tipo de empalme a realizar en la red. En este tramo se van a realizar dos tipos de empalmes:

- En los puntos más críticos que formen parte de la red de acceso, se llevarán a cabo empalmes por fusión, dado que forman parte del propio despliegue de la fibra. Estos empalmes son duraderos y fiables, y se realizarán exactamente igual que los empalmes programados sobre la red urbana.
- En los puntos menos críticos de la red, se realizarán empalmes mecánicos y no por fusión. Además, es necesario tener en cuenta que los empalmes que se produzcan en esta segunda etapa, se harán sólo en aquellos casos en los que se produzca un alta del usuario, por lo tanto no es necesario realizar estos empalmes durante la fase de despliegue de la red. El proceso de empalme a través de fusión implica un mayor coste y además la utilización de equipamiento preciso para ello, personal especializado, etc. Los técnicos dedicados al alta de usuarios no requieren conocer este proceso, por lo que el empalme mecánico es una solución rápida, barata y sencilla para el altero.

El número de empalmes que se van a llevar a cabo a lo largo de esta etapa de la red son 2 fusiones y 3 empalmes mecánicos, siendo éstos:

- Un empalme por fusión entre el latiguillo de conexión procedente de la salida del divisor de primera etapa y la fibra TKT 6FO de la red de acceso, situado en la caja de empalme de la arqueta ARQ10.
- Un empalme por fusión entre la fibra TKT 6FO de la red de acceso y el latiguillo de conexión procedente de la entrada al divisor de segunda etapa, situado en el armario MDU del R.I.T.I.
- Un empalme mecánico entre el latiguillo de conexión procedente de la salida divisor de segunda etapa y el latiguillo de conexión terminado en conector SC/APC de conexión con la fibra *riser* de un usuario determinado, situado en el armario MDU del R.I.T.I.
- Un empalme mecánico entre el latiguillo de conexión terminado en conector SC/APC de conexión de la fibra *riser* de un usuario determinado y dicha fibra *riser*, ubicado en el armario MDU del R.I.T.I.
- Un empalme mecánico entre el extremo de la fibra *riser* en la vivienda y el ONT de la vivienda, ubicado en el PTRO de la misma.

Las pérdidas medias de los empalmes por fusión es de 0.1 dB como máximo, mientras que las pérdidas medias de los empalmes mecánicos es de 0.3 dB. Por lo tanto el total de las pérdidas de empalme viene dado por la siguiente expresión:

$$\text{Pérdidas}_{\text{totales}} = A + B = 1.1 \text{ dB} \quad (129)$$

ya que:

$$A = \text{Pérdidas}_{\text{empalmes fusión}} = 0.1 \cdot 2 = 0.2 \text{ dB} \quad (130)$$

$$B = \text{Pérdidas}_{\text{empalmes mecanicos}} = 0.3 \cdot 3 = 0.9 \text{ dB} \quad (131)$$

También es necesario dimensionar el parámetro de margen de envejecimiento y variaciones de temperatura, cuyo valor típico analítico es $n = 1.5 \text{ dB}$ [6].

Nuevamente es necesario conocer el dato de atenuación de la fibra óptica en el rango de longitudes de onda comprendidas entre la 2ª y 5ª ventana, y tan sólo operar en la fórmula del balance con el más restrictivo de los tres.

Para el cable en cuestión de 6 FO monomodo TKT de marca OPTRAL modelo CDIX-LT estandarizado según G.652.D suministrado por el propietario, posee los siguientes valores de atenuación para las longitudes de onda de trabajo siguientes [56]:

- Atenuación para 1310 nm (canal subida): 0.35 dB/km.
- Atenuación para 1480 nm (canal bajada): 0.22 dB/km.
- Atenuación para 1550 nm (canal subida video): 0.21 dB/km.

Puesto que en este caso el despliegue es también monofibra, de nuevo es necesario escoger la condición de atenuación más restrictiva de los tres casos anteriores, siendo de 0.35 dB/km.

Con todos los datos calculados, ya se puede aplicar la ecuación (117) correspondiente al cálculo de longitud máxima del enlace óptico. Si se asignan los datos calculados a los parámetros de la ecuación, obtendríamos:

- $P_{op} = 18,3 \text{ dB}$
- $a = 2 \text{ conectores}$
- $C_a = 0.25 \text{ dB/conector}$
- $b_1 = 2 \text{ empalmes de fusión}$
- $S_{a1} = 0.1 \text{ dB/empalme}$
- $b_2 = 3 \text{ empalmes mecánicos}$
- $S_{a2} = 0.3 \text{ dB/empalme}$
- $n = 1.5 \text{ dB}$
- $F_a = 0.35 \text{ dB/km}$

$$L_{max} = \frac{P_{op} - a \cdot C_a - b_1 \cdot S_{a1} - b_2 \cdot S_{a2} - n}{F_a} \quad (132)$$

$$L_{max} = \frac{18.3 - 0.5 - 0.2 - 0.9 - 1.5}{0.35} = 43,42 \text{ km} \quad (133)$$

Por lo tanto, la longitud máxima del enlace para la primera y segunda etapa de división, es de 43,42 km de distancia. La mayor distancia de la red de acceso comprendida en el proyecto entre la caja de empalme de la arqueta ARQ10 y el ONT del usuario ubicado en la PTRO de la vivienda más alejada de dicha caja de empalme,

se da en el caso de la Finca 10 portal 63, donde el cable de acceso TKT 6FO tiene una longitud de 369 m y el cable riser de la vertical posee una longitud de 240 m, lo que supone una distancia de enlace total de $369 \text{ m} + 240 \text{ m} = 609 \text{ m}$. Por lo tanto, no es necesaria la instalación de amplificadores ópticos en el sistema.

El nuevo valor del balance óptico del enlace corresponde a la siguiente expresión:

$$\text{Balance} = 18.3 - 0.5 - 0.2 - 0.9 - 1.5 = 15.2 \text{ dB} \quad (134)$$

Teniendo en cuenta que el valor del margen de potencia de partida era de 18,3 dB, las pérdidas totales del sistema son:

$$\text{Pérdidas}_{\text{totales}} = 18,3 \text{ dB} - 15.2 \text{ dB} = 3.1 \text{ dB} \quad (135)$$

5.3.6.3. Conclusiones del balance óptico

Con los resultados obtenidos, se observa que a lo largo de la red urbana, el margen de potencia se devalúa en 2.7 dB, mientras que el margen de potencia a lo largo de la red de acceso se decrementa 3.1 dB. En total, supone una **pérdida global en el sistema de 5.8 dB**. Según el estándar GPON ITU-T G.984.2, existen tres tipos de redes según la calidad del sistema, asociadas directamente al margen de pérdidas de la red, tal y como se comentó en el apartado 2.6.2 *Capa física GPON* del Capítulo 2. Una red con un margen de pérdidas comprendido entre 5 y 10 dB, supone una ODN de tipo A de calidad excelente. Por lo tanto, el diseño de la red GPON lleva asociadas unas pérdidas considerablemente bajas, de tal forma que la red puede ser considerada como tipo A calidad excelente.

5.4. Planificación del proyecto

No menos importante es la planificación del proyecto. En este caso, y dado que se ha realizado un diseño exhaustivo del proyecto, la planificación intenta detallar aquellos aspectos no contemplados en el diseño y que son relevantes para la implantación del proyecto, tales como las circunstancias propietarias de la red y de las viviendas, disponibilidad de la red y conductos cedidos, detallado de la delineación del proyecto, costes y materiales del proyecto y cronograma de implantación. A continuación, se detallan las partes más importantes de planificación que complementan el desarrollo del proyecto.

5.4.1. Circunstancias propietarias de la red troncal urbana

Tal y como se detalla en el apartado de diseño de la red urbana, se ha realizado el diseño en base a la cesión del cable y de la canalización por parte del operador dominante de la zona, que ya posee infraestructura óptica en Vicálvaro.

Según la *Resolución MTZ 2008/626 con fecha 8 de mayo de 2008* de la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones [53], se establece que el operador dominante que ya posea infraestructura troncal óptica en una determinada ubicación deberá ceder obligatoriamente parte de sus cables ópticos e infraestructura de canalización a operadores minoritarios, en aras a preservar la competencia entre operadores.

De esta forma, y acogiéndose a la resolución anterior, el operador dominante propietario de la infraestructura óptica en las fincas de Vicálvaro, debe ceder las 6 fibras ópticas del cable 64 FO PKP, necesarias para la construcción de la red troncal urbana, instaladas en la canalización existente de la zona. Para obtener esta cesión, es necesario presentar un Anteproyecto de la red y/o el Proyecto de Ejecución ante la CMT y al operador dominante, encargado de estudiar las ventajas e inconvenientes de la cesión, que documentan a la CMT, encargada de dar el visto bueno al proceso de cesión [53].

5.4.2. Circunstancias propietarias de la red de acceso

La red de acceso, también cuenta con una solución propietaria basada en un acuerdo de colaboración entre el propietario de la canalización de baja tensión alrededor de las fincas, y la arqueta ARQ10 perteneciente a la red urbana.

El propietario de dicha canalización es una empresa eléctrica con la que, a través de un acuerdo de renta y colaboración mutua de explotación y mantenimiento de la canalización, se facilita la instalación del cable 6 FO TKT que permite la alimentación óptica desde la red urbana hasta cada R.I.T.I. instalado en las fincas correspondientes. La valoración de dicho contrato de colaboración no se incluirá dentro de los costes de despliegue de la red, dado que quedarán incluidos dentro del mantenimiento del servicio FTTH a las fincas.

En este caso, no existe un marco legislativo que regule este tipo de contratos entre entidades privadas, por lo que la empresa encargada de ceder su infraestructura puede establecer los criterios que crea conveniente para su firma. En este caso, la empresa eléctrica encargada de la cesión de su canalización de baja tensión firmó ante notario un contrato de renta anticipada a 25 años vista por valor de 15,72 € por cada metro lineal utilizado de su canalización, alegando que el 100% de las aportaciones se destinarán a labores de mantenimiento de la infraestructura.

5.4.3. Circunstancias propietarias de las fincas y viviendas

Para poder llevar a cabo la instalación del proyecto en cada una de las fincas, es necesario contar con la aprobación de cada Junta de Gobierno de cada finca en cuestión. Así pues, previamente a la instalación fue necesario el envío de una nota informativa de las actuaciones a realizar para la instalación del proyecto.

Esta carta informativa es individual para cada vecino, y tiene como finalidad poner en conocimiento de cada propietario el despliegue que se va a realizar sobre fibra óptica

de última generación, que permitirá disfrutar en los hogares de servicios de valor añadidos, tales como acceso a Internet a una velocidad muy superior a la de cualquier ADSL de mercado, televisión digital de alta definición, recepción simultánea de varios canales en el mismo domicilio, video bajo demanda, juegos en red, etc. También la carta indica que la instalación es completamente gratuita para los propietarios, lo que aumenta inmediatamente el valor de los inmuebles de cara al mercado.

Una vez puesto en conocimiento de cada comunidad de vecinos, es necesario que se reúnan en Asamblea General Ordinaria o Extraordinaria para aprobar o no la autorización de entrada a las fincas para instalar la infraestructura de cables y distribuidores pasivos de fibra óptica en los portales. Si se aprueba en Asamblea dicha instalación, es necesario que la Junta de Gobierno firme un documento de autorización con la firma del Presidente, Vicepresidente y 3 vocales de la Comunidad de Propietarios.

5.4.4. Delineación del proyecto

El proyecto queda completado con los planos de situación, planta y alzado del recorrido del cableado de red urbana y de red de acceso. Estos planos, junto a los planos de recorrido generales expuestos a lo largo del apartado 5.3 *Diseño del proyecto* son suficientes para concretar el recorrido del cable, situación de arquetas y elementos de acceso a la red, situación de elementos pasivos de las fincas y ubicación designada para la instalación de los elementos activos del sistema.

Los planos detallados del proyecto se encuentran disponibles en el Anexo I del proyecto, en formato A4 para una mejor visión de las instalaciones y del recorrido del cableado. Los tipos de planos, y número de ellos son los que se recogen en la siguiente tabla resumen, con su código de plano correspondiente.

Emplazamiento	Código de plano	Tipo de plano	Título del plano
Central de Acceso	CA01PL01	Plano de planta	Planta Central Acceso
Red Urbana	RU01PL01	Plano de planta	Red urbana
Red de Acceso	RA01PL01	Plano de planta	Plano general red acceso
Finca 7	FI07PL01	Plano de planta	Planta Garaje
	FI07AL01	Plano de alzado	Alzado Finca 7

Figura 142: Planos incluidos en la documentación

5.4.5. Materiales, mano de obra y costes del proyecto

La cantidad, tipo y características generales de los materiales que se han utilizado, han quedado reflejados y detallados a lo largo del apartado 5.3 *Diseño del proyecto*, por lo que no se considera necesario incluirlos en este punto. No obstante, en el apartado 5.5 *Instalación del proyecto* se reflejarán nuevamente los materiales utilizados por finca, así como el coste de los mismos. Estos costes se englobarán dentro del cálculo de costes generales de instalación y construcción de cada finca en concreto, y del coste final del proyecto.

5.4.6. Cronograma de implantación del proyecto

Para poder evaluar el tiempo completo de implantación del proyecto, es necesario realizar un cronograma que refleje de la forma más fiel posible los tiempos de ejecución del proyecto. Este cronograma incluye desde el lanzamiento del proyecto, replanteos y estudios socioculturales, hasta la instalación final de las fincas, pasando por el diseño de ingeniería del mismo.

Se ha estimado una duración total del proyecto de 18 semanas, desde el inicio hasta el final, considerándose como punto crítico del mismo la consecución de permisos a dos niveles:

- a) Por parte de la empresa de telecomunicaciones propietaria de la canalización y cables ópticos que formarán parte de la red troncal urbana.
- b) Por parte de la empresa eléctrica propietaria de la canalización de baja tensión sobre la que se instalarán los cables ópticos que forman parte de la red de acceso.
- c) Por parte de las comunidades de propietarios para el acceso a las fincas, necesario para la instalación de cuartos R.I.T.I. así como del tendido vertical hasta las viviendas.

Estos permisos se gestionan paralelamente unos respecto a otros, y por experiencias en despliegues anteriores se estima una media para la consecución de todos los permisos del orden de 3 meses desde que se inician los trámites. El propio hecho de contar con canalización ICT dentro de las viviendas, reduce el tiempo consecución de los permisos, dado que la infraestructura es opaca a los vecinos.

Otro de los puntos críticos de este tipo de despliegues es la concesión de las solicitudes de licencia de obra para las canalizaciones que pudieran resultar necesarias para la construcción. Este tipo de licencias se gestionan directamente con el Área de Gobierno de Urbanismo e Infraestructuras del Ayuntamiento de Madrid, e implica un período temporal bastante largo, desde que se produce la solicitud de la licencia de obra hasta la autorización final de la construcción. En este caso, ya se dispone de todas las canalizaciones subterráneas, lo que implícitamente supone un gran ahorro de tiempo a la hora de realizar el despliegue.

A continuación se muestra en la figura 143 el cronograma general estimativo del proyecto.

CRONOGRAMA DEL PROYECTO

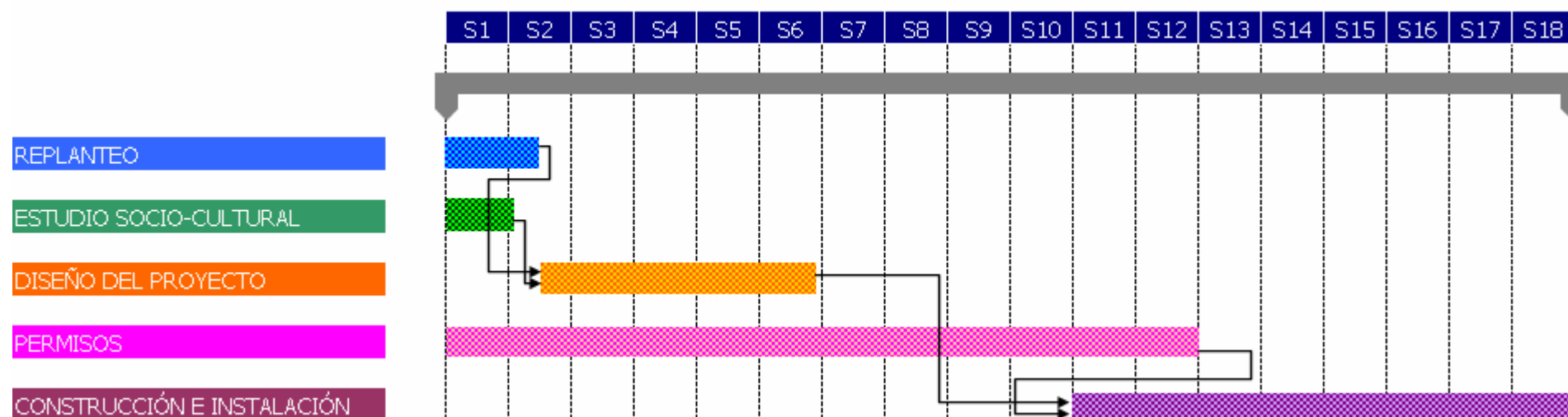


Figura 143: *Cronograma general del proyecto*

Tal y como se puede observar en el cronograma, la consecución de ciertos permisos permite la construcción e instalación de la finca asociada a dicho permiso. Por lo tanto, no es necesario esperar a conseguir todos los permisos de todas las fincas para comenzar la obra, sino que según se vayan consiguiendo permisos de instalación en cada finca, se comenzarán a realizar los tendidos en la misma. Se estima por lo tanto, tal y como se muestra en el cronograma, que la construcción e instalación de las fincas comenzarán en la semana 11, y la finalización de la misma se ha fijado en 7 semanas más tarde.

Es requisito indispensable para la redacción del proyecto el contar con el replanteo y el estudio socio-cultural estadístico de la zona. La fase de redacción del proyecto se ha prefijado en un tiempo de ejecución de entre 4 y 5 semanas, siendo requisito indispensable para la puesta en marcha e instalación de la red contar con el mismo completamente terminado.

5.5. Instalación del proyecto

La instalación del proyecto contempla todos los aspectos técnicos, obra civil y metodología de tendido de cable a través de las canalizaciones implicadas en el proyecto, ya sean por tendidos horizontales o verticales. Así mismo, también recoge la implantación de la sala donde se ubicará el nodo central de acceso que prestará servicio a las fincas, así como la instalación de cada R.I.T.I. en las fincas.

La metodología a llevar a cabo en estos trabajos, así como las recomendaciones asociadas a los mismos, quedan perfectamente detalladas en el Capítulo 5 del proyecto, por lo que dichos trabajos no se detallarán nuevamente.

Sin embargo, existen aspectos de la instalación que no se han reflejado en el Capítulo 5 y que son de vital importancia a la hora de elaborar y redactar un proyecto en su totalidad. En este caso, es necesario concretar la lista de materiales utilizados durante el proceso de instalación, así como el coste de los mismos y la mano de obra asociada a dicha instalación. Además, es muy importante tener en cuenta la nomenclatura final utilizada para la identificación de los elementos pasivos, tales como cables y fibras ópticas, cajas de derivación, cajas de empalme y demás elementos que se han tenido en cuenta a la hora de elaborar el diseño y que han de ser concretados en la etapa de instalación.

A continuación se concretan todos los aspectos de forma resumida que no han sido contemplados en la fase de diseño del proyecto.

5.5.1. Costes de materiales, mano de obra, ingeniería e instalación

En las tablas que se adjuntan a continuación, se detallan todos y cada uno de los costes asociados a los materiales empleados durante el proceso de implantación e instalación de la red. Estos costes incluyen el beneficio industrial de los fabricantes de los materiales y, por otra parte, el beneficio industrial asociado a la instalación de los mismos por parte de una empresa instaladora.

Asimismo, aparecen incluidos los costes de ingeniería, diseño, asistencia técnica y dirección de obra propios de cualquier proyecto, puesto que son necesarios para la puesta en marcha de este tipo de redes. Sin embargo, no se incluye el beneficio industrial propio de la empresa ejecutora y redactora del proyecto, dado que la finalidad de éste no es el ánimo lucrativo, sino la redacción de un proyecto final de carrera.

COSTE DE LA MANO DE OBRA EN FINCA 7

Denominación	Ud	Portal 10	Portal 12	Portal 73	Portal 75	Portal 77	Acometida de finca	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Instalar cable fibra óptica en canalización	M						55	55	1,62 €	88,94 €
Instalar cable de fibra óptica en edificio	M	129	140	64	110	125	105	673	4,31 €	2.901,98 €
Preparar extremo cable de F.O.	Ud	1	1	1	1	1	2	7	44,94 €	314,55 €
Preparar extremo cable de F.O. (CON SANGRIA)	Ud	7	10	7	7	10	1	42	56,25 €	2.362,50 €
Preparación de Puntas en Cable Raiser en ultima planta, dejando 25m de cable para recuperar fibras, dejando fibras sueltas para su posterior recuperación por planta	Ud	1	1	1	1	1		5	12,37 €	61,85 €
Preparar tubo cable de F.O.	Ud						2	2	2,70 €	5,40 €
Preparar tubo cable de F.O. (con sangria)	Ud						1	1	5,75 €	5,75 €
Instalar elemento de empalme (caja y armario) fibra óptica	Ud						1	1	37,93 €	37,93 €
Instalar caja de derivación por planta	Ud	7	10	7	7	10		41	37,93 €	1.555,05 €
Manipular cable o elemento de F.O. (emp., term., asoci.)	Ud						1	1	28,94 €	28,94 €
Empalmar F.O. monomodo	Ud						6	6	16,53 €	99,18 €
Instalación de registro de PVC 30x30 o similar para albergar reservas de fibras en planta superior	Ud	1	1	1	1	1		5	167,87 €	839,35 €
Instalar Obturador TDUX en tubo existente	Ud	7	10	7	7	10	5	46	4,88 €	224,25 €
Suministro e instalación de tubo flexible coarugado o40	M							0	0 €	0,00 €
Suministro e instalación de Bandeja Rejiband 100 mm.	M							0	0 €	0,00 €
TOTAL DE MANO DE OBRA EN FINCA 7										8.525,66 €

Figura 144: Coste de la mano de obra en FINCA 7

COSTE DE LOS MATERIALES EN FINCA 7

Denominación	Ud	Portal 10	Portal 12	Portal 73	Portal 75	Portal 77	Acometida de finca	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Cable 6 FO monomodo TKT marca Optral	M						160	160	2,65 €	424,00 €
Cable 24 FO monomodo Riser marca Verticasa Prysmian	M	129		64	110			303	2,11 €	639,33 €
Cable 48 FO monomodo Riser marca Verticasa Prysmian	M		140			125		265	3,54 €	938,10 €
Puerto oval entrada/4 salidas Prysmian	Ud	1	1	1	1	1		5	33,51 €	167,55 €
Elemento de protección Verticasa protection cover Prysmian	Ud	1	1	1	1	1		5	2,53 €	12,65 €
Elemento de apertura Verticasa opening tool Prysmian	Ud						1	1	89,32 €	89,32 €
Caja de derivación por planta Verticasa Riser Box Prysmian	Ud	7	10	7	7	10		41	26,70 €	1.094,70 €
Caja empalme capacidad 4-8 divisores 1:16 y terminación 4-8 cables, tipo MDU PRYSMIAN	Ud			1				1	379,20 €	379,20 €
Divisor óptico 1:16 montado en bandeja para caja de empalme	Ud			3				3	136,30 €	408,90 €
Protector de empalme	Ud						6	6	0,80 €	4,80 €
TOTAL DE MATERIALES EN FINCA 7										4.158,55 €

TOTAL PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN FINCA 7	12.684,21 €
--	--------------------

Figura 145: Coste de materiales y total de presupuesto en FINCA 7

COSTE DE LA MANO DE OBRA EN FINCA 8-A

Denominación	Ud	Portal D	Portal E	Portal F	Portal G	Portal H	Portal I	Acometida de finca	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Instalar cable fibra óptica en canalización	M							42	42	1,62 €	68,04 €
Instalar cable de fibra óptica en edificio	M	156	140	127	98	65	84	256	256	4,31 €	1.103,36 €
Preparar extremo cable de F.O.	Ud	1	1	1	1	1	1	2	8	44,94 €	359,52 €
Preparar extremo cable de F.O. (CON SANGRIA)	Ud	6	6	6	6	6	6	1	37	56,25 €	2.081,25 €
Preparación de Puntas en Cable Raiser en ultima planta, dejando 25m de cable para recuperar fibras, dejando fibras sueltas para su posterior recuperación por planta	Ud	1	1	1	1	1	1		6	12,37 €	74,22 €
Preparar tubo cable de F.O.	Ud							2	2	2,70 €	5,40 €
Preparar tubo cable de F.O. (con sangria)	Ud							1	1	5,75 €	5,75 €
Instalar elemento de empalme (caja y armario) fibra óptica	Ud							1	1	37,93 €	37,93 €
Instalar caja de derivación por planta	Ud	6	6	6	6	6	6		36	37,93 €	1365,48 €
Manipular cable o elemento de F.O. (emp., term., asoci.)	Ud							1	1	28,94 €	28,94 €
Empalmar F.O. monomodo	Ud							6	6	16,53 €	99,18 €
Instalación de registro de PVC 30x30 o similar para albergar reservas de fibras en planta superior	Ud	1	1	1	1	1	1		6	167,87 €	1.007,22 €
Instalar Obturador TDUX en tubo existente	Ud	6	6	6	6	6	6		36	4,88 €	175,68 €
Suministro e instalación de tubo flexible coarugado o40	M								0	0 €	0,00 €
Suministro e instalación de Bandeja Rejiband 100 mm.	M								0	0 €	0,00 €
TOTAL DE MANO DE OBRA EN FINCA 8-A											6.411,97 €

Figura 146: Coste de la mano de obra en FINCA 8-A

COSTE DE LOS MATERIALES EN FINCA 8-A

Denominación	Ud	Portal D	Portal E	Portal F	Portal G	Portal H	Portal I	Acometida de finca	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Cable 6 FO monomodo TKT marca Optral	M							298	298	2,65 €	789,70 €
Cable 24 FO monomodo Riser marca Verticasa Prysmian	M	156	140			65	84		445	2,11 €	938,95 €
Cable 48 FO monomodo Riser marca Verticasa Prysmian	M			127	98				225	3,54 €	796,50 €
Puerto oval entrada/4 salidas Prysmian	Ud	1	1	1	1	1	1		6	33,51 €	201,06 €
Elemento de protección Verticasa protection cover Prysmian	Ud	1	1	1	1	1	1		6	2,53 €	15,18 €
Elemento de apertura Verticasa opening tool Prysmian	Ud							1	1	89,32 €	89,32 €
Caja de derivación por planta Verticasa Riser Box Prysmian	Ud	6	6	6	6	6	6		36	26,70 €	961,12 €
Caja empalme capacidad 4-8 divisores 1:16 y terminación 4-8 cables, tipo MDU PRYSMIAN	Ud					1			1	379,20 €	379,20 €
Divisor óptico 1:16 montado en bandeja para caja de empalme	Ud					3			3	136,30 €	408,90 €
Protector de empalme	Ud							6	6	0,80 €	4,80 €
TOTAL DE MATERIALES EN FINCA 8-A											4.584,73 €

TOTAL PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN FINCA 8-A	10.996,70 €
---	-------------

Figura 147: Coste de los materiales y total del presupuesto en Finca 8-A

COSTE DE LA MANO DE OBRA EN FINCA 8-B

Denominación	Ud	Portal A	Portal B	Portal C	Portal J	Portal K	Portal L	Acometida de finca	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Instalar cable fibra óptica en canalización	M							105	105	1,62 €	170,01 €
Instalar cable de fibra óptica en edificio	M	62	123	134	78	65	92	67	621	4,31 €	2.676,51 €
Preparar extremo cable de F.O.	Ud	1	1	1	1	1	1	2	8	44,94 €	359,52 €
Preparar extremo cable de F.O. (CON SANGRIA)	Ud	7	6	6	6	6	7	1	39	56,25 €	2.193,75 €
Preparación de Puntas en Cable Raiser en ultima planta, dejando 25m de cable para recuperar fibras, dejando fibras sueltas para su posterior recuperación por planta	Ud	1	1	1	1	1	1		6	12,37 €	74,22 €
Preparar tubo cable de F.O.	Ud							2	2	2,70 €	5,40 €
Preparar tubo cable de F.O. (con sangria)	Ud							1	1	5,75 €	5,75 €
Instalar elemento de empalme (caja y armario) fibra óptica	Ud							1	1	37,93 €	37,93 €
Instalar caja de derivación por planta	Ud	7	6	6	6	6	7		38	37,93 €	1.441,34 €
Manipular cable o elemento de F.O. (emp., term., asoci.)	Ud							1	1	28,94 €	28,94 €
Empalmar F.O. monomodo	Ud							6	6	16,53 €	99,18 €
Instalación de registro de PVC 30x30 o similar para albergar reservas de fibras en planta superior	Ud	1	1	1	1	1	1		6	167,87 €	1.007,22 €
Instalar Obturador TDUX en tubo existente	Ud	7	6	6	6	6	7		38	4,88 €	185,44 €
Suministro e instalación de tubo flexible coarrugado o40	M								0	0 €	0,00 €
Suministro e instalación de Bandeja Rejiband 100 mm.	M								0	0 €	0,00 €
TOTAL DE MANO DE OBRA EN FINCA 8-B											8.285,21 €

Figura 148: Coste de la mano de obra en FINCA 8-B

COSTE DE LOS MATERIALES EN FINCA 8-B

Denominación	Ud	Portal A	Portal B	Portal C	Portal J	Portal K	Portal L	Acometida de finca	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Cable 6 FO monomodo TKT marca Optral	M							172	172	2,65 €	455,80 €
Cable 24 FO monomodo Riser marca Verticasa Prysmian	M		123	134	78	65			400	2,11 €	844,00 €
Cable 48 FO monomodo Riser marca Verticasa Prysmian	M	62					92		154	3,54 €	454,16 €
Puerto oval entrada/4 salidas Prysmian	Ud	1	1	1	1	1	1		6	33,51 €	201,06 €
Elemento de protección Verticasa protection cover Prysmian	Ud	1	1	1	1	1	1		6	2,53 €	15,18 €
Elemento de apertura Verticasa opening tool Prysmian	Ud							1	1	89,32 €	89,32 €
Caja de derivación por planta Verticasa Riser Box Prysmian	Ud	7	6	6	6	6	7		38	26,70 €	1.014,60 €
Caja empalme capacidad 4-8 divisores 1:16 y terminación 4-8 cables, tipo MDU PRYSMIAN	Ud						1		1	379,20 €	379,20 €
Divisor óptico 1:16 montado en bandeja para caja de empalme	Ud						3		3	136,30 €	408,90 €
Protector de empalme	Ud							6	6	0,80 €	4,80 €
TOTAL DE MATERIALES EN FINCA 8-A											3.867,02 €

TOTAL PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN FINCA 8-B	12.152,23 €
---	-------------

TOTAL PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN FINCA 8 (8-A Y 8-B)	23.118,93 €
---	-------------

Figura 149: Coste de los materiales y total del presupuesto en Finca 8

COSTE DE LA MANO DE OBRA EN FINCA 9

Denominación	Ud	Portal 2	Portal 4	Portal 70	Acometida de finca	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Instalar cable fibra óptica en canalización	M				76	76	1,62 €	123,12 €
Instalar cable de fibra óptica en edificio	M	98	67	124	158	447	4,31 €	1.926,57 €
Preparar extremo cable de F.O.	Ud	1	1	1	2	5	44,94 €	224,70 €
Preparar extremo cable de F.O. (CON SANGRIA)	Ud	8	7	6	1	22	56,25 €	1.237,50 €
Preparación de Puntas en Cable Raiser en ultima planta, dejando 25m de cable para recuperar fibras, dejando fibras sueltas para su posterior recuperación por planta	Ud	1	1	1		3	12,37 €	37,11 €
Preparar tubo cable de F.O.	Ud				2	2	2,70 €	5,40 €
Preparar tubo cable de F.O. (con sangria)	Ud				1	1	5,75 €	5,75 €
Instalar elemento de empalme (caja y armario) fibra óptica	Ud				1	1	37,93 €	37,93 €
Instalar caja de derivación por planta	Ud	8	7	6		21	37,93 €	796,535 €
Manipular cable o elemento de F.O. (emp., term., asoci.)	Ud				1	1	28,94 €	28,94 €
Empalmar F.O. monomodo	Ud				6	6	16,53 €	99,18 €
Instalación de registro de PVC 30x30 o similar para albergar reservas de fibras en planta superior	Ud	1	1	1		3	167,87 €	503,61 €
Instalar Obturador TDUX en tubo existente	Ud	8	7	6		21	4,88 €	102,48 €
Suministro e instalación de tubo flexible coarugado o40	M					0	0 €	0,00 €
Suministro e instalación de Bandeja Rejiband 100 mm.	M					0	0 €	0,00 €
TOTAL DE MANO DE OBRA EN FINCA 9								5.128,83 €

Figura 150: Coste de la mano de obra en FINCA 9

COSTE DE LOS MATERIALES EN FINCA 9

Denominación	Ud	Portal 2	Portal 4	Portal 70	Acometida de finca	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Cable 6 FO monomodo TKT marca Optral	M				234	234	2,65 €	620,01 €
Cable 24 FO monomodo Riser marca Verticasa Prysmian	M					0	2,11 €	0,00 €
Cable 48 FO monomodo Riser marca Verticasa Prysmian	M	98	67	124		289	3,54 €	1.023,06 €
Puerto oval entrada/4 salidas Prysmian	Ud	1	1	1		3	33,51 €	100,53 €
Elemento de protección Verticasa protection cover Prysmian	Ud	1	1	1		3	2,53 €	7,59 €
Elemento de apertura Verticasa opening tool Prysmian	Ud				1	1	89,32 €	89,32 €
Caja de derivación por planta Verticasa Riser Box Prysmian	Ud	8	7	6		21	26,70 €	560,70 €
Caja empalme capacidad 4-8 divisores 1:16 y terminación 4-8 cables, tipo MDU PRYSMIAN	Ud		1			1	379,20 €	379,20 €
Divisor óptico 1:16 montado en bandeja para caja de empalme	Ud		3			3	136,30 €	408,90 €
Protector de empalme	Ud				6	6	0,80 €	4,80 €
TOTAL DE MATERIALES EN FINCA 9								3.194,11 €

TOTAL PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN FINCA 9	8.322,94 €
--	-------------------

Figura 151: Coste de los materiales y total del presupuesto en Finca 9

COSTE DE LA MANO DE OBRA EN FINCA 10

Denominación	Ud	Portal 1	Portal 3	Portal 5	Portal 7	Portal 13	Portal 15	Portal 61	Portal 63	Acometida de finca	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Instalar cable fibra óptica en canalización	M									57	57	1,62 €	92,34 €
Instalar cable de fibra óptica en edificio	M	104	72	61	78	166	180	253	240	425	1.579	4,31 €	6.805,49€
Preparar extremo cable de F.O.	Ud	1	1	1	1	1	1	1	1	2	10	44,94 €	449,40 €
Preparar extremo cable de F.O. (CON SANGRIA)	Ud	6	8	6	6	6	9	6	7	1	55	56,25 €	3.093,75 €
Preparación de Puntas en Cable Raiser en ultima planta, dejando 25m de cable para recuperar fibras, dejando fibras sueltas para su posterior recuperación por planta	Ud	1	1	1	1	1	1	1	1		8	12,37 €	98,96€
Preparar tubo cable de F.O.	Ud									2	2	2,70 €	5,40 €
Preparar tubo cable de F.O. (con sangria)	Ud									1	1	5,75 €	5,75 €
Instalar elemento de empalme (caja y armario) fibra óptica	Ud									1	1	37,93 €	37,93 €
Instalar caja de derivación por planta	Ud	6	8	6	6	6	9	6	7		54	37,93 €	2.048,22 €
Manipular cable o elemento de F.O. (emp., term., asoci.)	Ud									1	1	28,94 €	28,94 €
Empalmar F.O. monomodo	Ud									6	6	16,53 €	99,18 €
Instalación de registro de PVC 30x30 o similar para albergar reservas de fibras en planta superior	Ud	1	1	1	1	1	1	1	1		8	167,87 €	1.342,96 €
Instalar Obturador TDUX en tubo existente	Ud	6	8	6	6	6	9	6	7		54	4,88 €	263,52 €
Suministro e instalación de tubo flexible coarrugado o40	M										2	9,04 €	18,08 €
Suministro e instalación de Bandeja Rejiband 100 mm.	M										40	25,00 €	1.000,00 €
TOTAL DE MANO DE OBRA EN FINCA 10													15.389,92 €

Figura 152: Coste de la mano de obra en FINCA 10

COSTE DE LOS MATERIALES EN FINCA 10

Denominación	Ud	Portal 1	Portal 3	Portal 5	Portal 7	Portal 13	Portal 15	Portal 61	Portal 63	Acometida de finca	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Cable 6 FO monomodo TKT marca Optral	M									482	482	2,65 €	1.277,30 €
Cable 24 FO monomodo Riser marca Verticasa Prysmian	M	104		61	78	166		253			668	2,11 €	1.409,48 €
Cable 48 FO monomodo Riser marca Verticasa Prysmian	M		72				180		240		492	3,54 €	1.741,68 €
Puerto oval entrada/4 salidas Prysmian	Ud	1	1	1	1	1	1	1	1		8	33,51 €	268,08 €
Elemento de protección Verticasa protection cover Prysmian	Ud	1	1	1	1	1	1	1	1		8	2,53 €	20,24 €
Elemento de apertura Verticasa opening tool Prysmian	Ud									1	1	89,32 €	89,32 €
Caja de derivación por planta Verticasa Riser Box Prysmian	Ud	6	8	6	6	6	9	6	7		54	26,70 €	1.441,80 €
Caja empalme capacidad 4-8 divisores 1:16 y terminación 4-8 cables, tipo MDU PRYSMIAN	Ud			1							1	379,20 €	379,20 €
Divisor óptico 1:16 montado en bandeja para caja de empalme	Ud			3							3	136,30 €	408,90 €
Protector de empalme	Ud									6	6	0,80 €	4,80 €
TOTAL DE MATERIALES EN FINCA 10													7.040,80 €

TOTAL PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN FINCA 10	22.430,72 €
--	-------------

Figura 153: Coste de los materiales y total del presupuesto en Finca 10

COSTE DE LA MANO DE OBRA EN CENTRAL DE ACCESO, RED URBANA Y RED DE ACCESO

Denominación	Ud	Central de Acceso	Red Urbana Troncal	Red de acceso	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Preparar extremo cable de F.O.	Ud	6	6		12	44,94 €	539,28 €
Preparar extremo cable de F.O. (CON SANGRIA)	Ud	6	6		12	56,25 €	675,00 €
Instalar rack 19" OMX	Ud	1			1	65,37 €	65,37 €
Instalar módulos de terminación conectores/divisores/empalmes en OMX	Ud	2			2	8,17 €	16,34 €
Instalar módulo de almacenamiento en OMX	Ud	1			1	12,34 €	12,34 €
Instalar bandeja de conectores, empalme y/o divisores en OMX	Ud	1			1	0,82 €	0,82 €
Medida de retroespaciamento en FO monomodo	Ud		6	6	12	5,77 €	69,24 €
Medida pérdida de inserción en FO monomodo	Ud		6	6	12	5,77 €	69,24 €
Preparar tubo cable de F.O.	Ud	1			1	2,70 €	2,70 €
Preparar tubo cable de F.O. (con sangria)	Ud	1			1	5,75 €	2,70 €
Instalar elemento de empalme (caja y/o armario) fibra óptica	Ud			1	1	37,93 €	37,93 €
Manipular cable o elemento de F.O. (emp., term., asoc.)	Ud			1	1	28,94 €	28,94 €
Empalmar F.O. monomodo	Ud	6		6	12	16,53 €	198,36 €
Instalar Obturador TDUX en tubo existente	Ud	1		1	2	4,88 €	9,76 €
Suministro e instalación de tubo flexible coarrugado o40	M				0	9,04 €	0,00 €
Suministro e instalación de Bandeja Rejiband 100 mm.	M	35			35	25,00 €	875,00 €
TOTAL DE MANO DE OBRA EN CENTRAL DE ACCESO, RED URBANA Y RED DE ACCESO							2.530,75 €

Figura 154: Coste de la mano de obra en central de acceso, red urbana y red de acceso

COSTE DE MATERIALES EN CENTRAL DE ACCESO, RED URBANA Y RED DE ACCESO

Denominación	Ud	Central de Acceso	Red Urbana Troncal	Red de acceso	Total de unidades	Precio Unitario	TOTAL
Cable 64 FO PKP monomodo OPTRAL	M				0	2,76 €	0,00 €
Repartidor óptico bastidor OMX MX6-TSF6030 ADC-Krone	Ud	1			1	1.147,13 €	1.147,13 €
Cordón monofibra SC-APC con acoplador monofibra 5m	Ud	6			6	17,54 €	105,24 €
Latiguillo monofibra SC-APC monofibra 5m	Ud	6			6	13,27 €	79,62 €
Módulo de terminación 64 conectores SC-APC en OMX	Ud	1			1	1.376,32 €	1.376,32 €
Módulo de almacenamiento interno en OMX	Ud	1			1	56,93 €	56,93 €
Módulo de terminación de empalme 24 bandejas en OMX	Ud	1			1	246,68 €	246,68 €
Bandeja de conectores, empalme y/o divisores en OMX	Ud	1			1	21,51 €	21,51 €
Kit de estanqueidad para repartidor OMX	Ud	1			1	201,25 €	201,25 €
Divisor óptico 1:4 entradas/salidas frontales SC-APC ADC-Krone	Ud			6	6	142,28 €	853,68 €
Caja de empalme exterior 240 empalmes/20 bandejas Tyco FIST-GCOG2	Ud			1	1	207,09 €	207,09 €
Empalme mecánico	Ud				0	4,11 €	0,00 €
Protector de empalme	Ud	6		6	12	0,80 €	9,60 €
TOTAL DE MATERIALES EN CENTRAL DE ACCESO, RED URBANA Y RED DE ACCESO							4.305,05 €

TOTAL PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN CENTRAL ACCESO, RED URBANA Y RED ACCESO	6.835,80 €
--	-------------------

TOTAL PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN PROYECTO	73.392,60 €
---	--------------------

Figura 155: Coste de la mano de obra en central de acceso, red urbana, red de acceso, y coste total de la construcción del proyecto

COSTE DE DISEÑO, INGENIERÍA, ASISTENCIA TÉCNICA Y DIRECCIÓN DE OBRA

Denominación	Ud	Nº horas	Nº unidades	Precio Unitario	TOTAL
Estudio socio-cultural estadístico	Ud		1	3.200 €	3.200,00 €
Replanteo del proyecto, incluidos desplazamientos	Ud		3	175,50 €	526,50 €
Estudio de viabilidad inicial del proyecto, incluidas todas las fincas del proyecto	Ud		1	248,75 €	248,75 €
Diseño e ingeniería del proyecto	Ud	112		32,70 €	3.662,40 €
Gestión de permisos comunitarios, considerándose una gestión por finca	Ud		4	160,08 €	640,32 €
Gestión de permisos propietarios, considerándose una gestión por compañía propietaria	Ud		2	145,80 €	291,60 €
Asistencia técnica y dirección de obra del proyecto, incluidos desplazamientos	Ud	120		38,65 €	4.638,00 €
TOTAL DE COSTE DE DISEÑO, INGENIERÍA, ASISTENCIA TÉCNICA Y DIRECCIÓN DE OBRA					13.207,57 €

TOTAL PRESUPUESTO NETO DEL PROYECTO	86.600,17 €
--	--------------------

BENEFICION INDUSTRIAL	0,00 €
------------------------------	---------------

TOTAL PROYECTO	86.600,17 €
-----------------------	--------------------

Figura 156: Coste de diseño, ingeniería, asistencia técnica, dirección de obra. Coste total del proyecto

5.5.2. Medidas de reflectometría de la red

Para llevar a cabo una certificación final del sistema, es necesario realizar las pruebas de reflectometría sobre fibra óptica que garantice la transmisión de la señal a través de cada fibra en ambos sentidos. Además, se debe alcanzar un umbral mínimo de emisión que permita la transmisión de información sobre la potencia óptica mínima requerida.

Las medidas que se han realizado en este caso, corresponden a las 15 fibras ópticas que quedarán en servicio una vez puesto en marcha el equipamiento activo de la red. Las medidas se han llevado a cabo en 2ª y 3ª ventanas operativas, dado que los servicios FTTH necesitan ambas longitudes de onda para un funcionamiento completo y correcto. Además, se han realizado las medidas en ambos sentidos de la fibra, es decir, de la central a cada R.I.T.I., y viceversa. De esta forma, cada enlace de fibra ha sido objeto de 4 mediciones:

- Medida Oeste-Este 1, con origen en la central de acceso y destino el R.I.T.I., en longitud de onda de trabajo de 1310 nm.
- Medida Oeste-Este 2, con origen en la central de acceso y destino en el R.I.T.I., en longitud de onda de trabajo de 1550 nm.
- Medida Este-Oeste 1, con origen en R.I.T.I y destino en la central de acceso, en longitud de onda de trabajo de 1310 nm.
- Medida Este-Oeste 2, con origen en R.I.T.I y destino en la central de acceso, en longitud de onda de trabajo de 1550 nm.

A continuación, se muestra una tabla con el número total de medidas realizadas sobre la red troncal urbana y la red de acceso del proyecto.

MEDIDAS DE REFLECTOMETRÍA Y POTENCIA			
Fibra	Medida	Dirección	Ventana operativa
Fibra 59 (OPERADOR 1)	R.I.T.I. Finca 7	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 7	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 7	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 7	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 9	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 9	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 9	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 9	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 10	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 10	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 10	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 10	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
Fibra 60 (OPERADOR 1)	R.I.T.I. Finca 8-B	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-B	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 8-B	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-B	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm

Fibra 61 (OPERADOR 2)	R.I.T.I. Finca 7	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 7	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 7	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 7	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 9	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 9	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 9	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 9	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 10	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 10	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 10	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 10	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
Fibra 62 (OPERADOR 2)	R.I.T.I. Finca 8-B	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-B	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 8-B	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-B	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
Fibra 63 (OPERADOR 3)	R.I.T.I. Finca 7	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 7	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 7	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 7	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-A	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 9	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 9	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 9	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 9	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 10	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 10	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 10	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 10	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm
Fibra 64 (OPERADOR 3)	R.I.T.I. Finca 8-B	O-E: Central - RITI	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-B	O-E: Central - RITI	3ª ventana 1550 nm
	R.I.T.I. Finca 8-B	E-O: RITI - Central	2ª ventana 1310 nm
	R.I.T.I. Finca 8-B	E-O: RITI - Central	3ª ventana 1550 nm

Figura 157: Medidas de reflectometría y potencia de las fincas

5.5.3. Etiquetado y documentación del sistema

La identificación de los sistemas pasivos que constituyen la red PON del proyecto es una parte esencial y necesaria propia de la instalación. El etiquetado de todos y cada uno de los elementos de la red, es una tarea muy compleja para llevarlo a cabo en la fase de diseño, dado que el proceso de instalación puede llevar asociado pequeñas variaciones del diseño inicial del proyecto. Estas modificaciones introducidas en la última fase, pueden dar lugar a equívocos si ya se ha fijado la nomenclatura final; de ahí que el etiquetado se lleve a cabo en la última fase del proyecto.

Capítulo 6

Conclusiones

A lo largo del proyecto, se han llevado a cabo varias líneas de actuación generales cuyo desarrollo ha dado como resultado un conocimiento exhaustivo de una red FTTH a todos los niveles, siendo éstas:

- Detalle teórico y fundamentos físicos del funcionamiento de las redes ópticas.
- Diseño pormenorizado de una red FTTH, a través de las diferentes fases de diseño.
- Instalación, presupuestación y medida de calidad de una red FTTH, que finalizan el proyecto con la certificación final de obra.

Previo a ello, la exposición sobre las redes FTTH, así como sus características, y su origen y evolución a lo largo del tiempo permiten conocer el campo de trabajo sobre el que se va realizar el proyecto.

El detalle teórico de las redes ópticas se considera imprescindible para comprender de forma concreta las redes FTTH, así como necesario para poder realizar un diseño concreto de la red óptica pasiva sobre la que se construyen este tipo de redes. A la hora de realizar cualquier diseño, es imprescindible conocer la tecnología sobre la que se basa dado que la solución final dependerá de las necesidades que se presenten y de las características y topología de cada tipo de red.

Así pues, se han concretado los fundamentos físicos de la tecnología óptica, que detallan y especifican las teorías de transmisión a través de estos medios de transmisión. La comprensión previa de la metodología de transmisión de información a través de la fibra óptica, ha permitido conocer las ventajas de estos sistemas a nivel físico, así como las limitaciones que poseen las redes de fibra óptica, a tener en cuenta en la fase de diseño de la red física.

También se han detallado los principales elementos ópticos pasivos que intervienen en el diseño de las redes FTTH, tales como tipos de fibras ópticas, cables ópticos, cajas de empalme, divisores ópticos, etc. Esta recopilación ha permitido revisar los elementos pasivos existentes en el mercado necesarios para la instalación y puesta en marcha de la red óptica pasiva, así como para detallar los elementos a utilizar en el despliegue del proyecto.

Una vez conocida la estructura y características de estas redes, las limitaciones propias del medio de transmisión sobre el que se basa y los elementos activos y pasivos necesarios para la implementación de estas redes, se ha realizado una presentación general del proyecto a diseñar, detallando el escenario de despliegue y concretando las condiciones iniciales de diseño .

El proyecto consistía en diseñar y desplegar la infraestructura pasiva de una red FTTH en una zona concreta de Madrid compuesta por 4 fincas multifamiliares, cada una de ellas totalmente independientes y con un total de 701 viviendas, aplicando el modelo comercial de operador neutro. El diseño debía de estar capacitado para alquilar la red desplegada a 3 operadores finales como mínimo que se encargarán de la infraestructura activa del sistema.

Así pues, fue necesario la realización de un estudio previo del sistema que garantizase la viabilidad del mismo antes de comenzar cualquier tipo de diseño, así como un estudio sociocultural estadístico sobre los usuarios afectados por el despliegue, que permitió extraer el índice de penetración del sistema FTTH en valores estimados.

Con esta información de partida y con las condiciones generales de diseño se procedió a realizar un replanteo en firme del proyecto, que permitió la recopilación de datos *in situ* sobre las fincas del proyecto: ubicación de la central de acceso, canalizaciones subterráneas disponibles para tendido de cable, ubicación de las etapas de división, ubicación de los R.I.T.I.s de las fincas, estado de la infraestructura ICT de los edificios, etc.

Una vez extraídos los datos en campo se realizó un diseño pormenorizado de cada una de las partes que constituyen la red final, dividiéndose concretamente en tres partes claramente diferenciadas:

- Diseño de la central de acceso, donde se ubicaron los elementos terminales de la red óptica pasiva que actuarán como puente de enlace con el equipamiento activo de la red, a cuenta de los operadores de telefonía que prestarán el servicio final.
- Diseño de la red troncal urbana, donde se decidió utilizar para tal fin fibra óptica ya instalada en la zona. Estas fibras son las encargadas de distribuir la señal óptica hasta las viviendas y cuenta con dos etapas de división a lo largo de su recorrido: una primera etapa –ubicada concretamente en una zona cercana a las fincas- para dividir e independizar las señales procedentes de cada operador; y una segunda etapa –ubicada en cada R.I.T.I. de cada finca- para transportar cada una de ellas hasta cada vivienda.
- Diseño de la red de acceso, constituida por:
 - ♦ El cableado de la red de acceso, encargado de transportar las señales ópticas desde la primera etapa de división hasta los R.I.T.I.s de cada finca.
 - ♦ Los R.I.T.I.s de cada finca, que albergan los elementos ópticos pasivos encargados de realizar la segunda etapa de división y de interconectar señales de operadores diferentes.

- ♦ El cableado vertical ICT de las viviendas, encargado de la distribución óptica de la señal procedente de cada operador hasta cada vivienda particular.

En este proceso de diseño se han tenido en cuenta dos consideraciones claramente diferenciadores de un diseño habitual de red FTTH. La primera de ellas es la ubicación física de las etapas de división. La distribución de éstas a lo largo de la red frente a su concentración en la central de acceso, permite reducir la ocupación final de la red troncal, favoreciendo a su vez la reducción de costes y mejorando la capacidad ante futuras ampliaciones. La segunda, es la utilización de un sistema de cableado vertical constituido por cables *riser* con reserva por cada usuario en cada planta, frente a la solución habitual de utilizar cables sin reserva. De esta forma, se evita la realización de empalmes mecánicos y tendidos de fibra, reduciendo las pérdidas ópticas del sistema y aminorando el coste global de las altas de cada usuario.

El diseño no sólo contempla las características y tipología de diseño de la red, sino también los elementos ópticos a instalar en el sistema, tales como tipos de cables y fibras ópticas, divisores ópticos, bastidores, cajas de empalme, cajas distribuidoras y demás elementos ópticos que garanticen una buena calidad de servicio y optimicen los recursos existentes instalados aminorando los costes globales de despliegue.

También se ha realizado el balance óptico de la red, que ha permitido corroborar teóricamente la viabilidad física de la red en términos de potencia óptica. Este balance se ha realizado a partir de los datos reales del diseño, es decir, incluyendo las distancias concretas de cada enlace, así como todas las pérdidas existentes en el sistema, tales como divisores o empalmes.

Estos cálculos teóricos, se validaron y certificaron una vez que se realizaron las medidas de reflectometría y potencia de la red, donde se obtuvieron los datos reales del balance óptico y que al contrastarse con los datos teóricos se verifica la viabilidad de la red.

La última fase del proyecto contempla la planificación e instalación de la red diseñada. Para ello, fue necesario tener en cuenta los diferentes procedimientos, recomendaciones y normativas de instalación de redes ópticas, que garantizan un correcto despliegue de la red y minimizan los posibles problemas que puedan aparecer a corto y largo plazo, tanto a nivel físico y lógico de funcionamiento, como a nivel burocrático con administraciones públicas y entidades privadas y propietarias.

Por último, y para completar la fase de implantación de la red, ha sido necesario realizar el cálculo presupuestario final de la instalación completa de la red, arrojando datos reales sobre el precio de coste del diseño de ingeniería e instalación de una red FTTH con las características propias del emplazamiento en estudio.

El coste final de la instalación implica una inversión inicial por parte del operador (neutro o telefónico) que amortizará a lo largo de los primeros años de servicio, en función de la repercusión del coste final a los usuarios y de la política de precios del operador en cuestión. En muchas ocasiones, los operadores de telefonía son reticentes a

invertir en tecnologías de banda ancha sin tener claro un rendimiento económico a corto plazo, por lo que se generan ciertos retrasos en inversiones de última tecnología.

Para poder evitar un retraso en inversiones de infraestructura de última generación y dotar a la población en su conjunto de redes integradas con servicios Triple Play, se ha apostado en el proyecto por un modelo de operador neutro. De esta forma, el operador neutro sufraga la inversión inicial de instalación, que es la mayor del sistema, y se encarga de ofrecer dicha red a los operadores que finalmente serán los que se encarguen de explotar el servicio a través del equipamiento activo.

La posición del operador neutro como figura en el sistema tiene dos finalidades claramente diferenciadas: evitar la inversión inicial de despliegue por parte de los operadores, y subsistir como propietario de la red mediante el arrendamiento de la misma a los operadores que prestan el servicio final a los usuarios. Este hecho, trasladado a un contexto económico conlleva la aparición de empresas encargadas del despliegue de red, especializándose en esta área y pudiendo ofrecer mejores soluciones de red a precios más competitivos.

Además, con el modelo de operador neutro se puede reaprovechar la red para diferentes operadores, de tal forma que no es necesario que tengan que instalar su propia infraestructura de red, saturando la infraestructura general de red y la propia de cada edificio de viviendas. Con una sola instalación en R.I.T.I. y en canalización vertical se permite el acceso a varios operadores finales. En este caso, se permite la inclusión de hasta 3 operadores distintos, por lo que gracias a este diseño la infraestructura ocupa un 66% menos. No obstante, la red se encuentra dimensionada para ofrecer servicio hasta 3 operadores más, lo que supone un total de hasta 6 operadores diferentes en servicio, y lo que supone un ahorro de espacio e infraestructura de hasta 6 veces menos, en el caso de que cada operador desplegara su propia red.

En relación con lo anterior, la inclusión de un nuevo tipo de diseño basado en sistemas directos desde el R.I.T.I. hasta el ONT la vivienda, evitan la inclusión de pérdidas por empalme en este tramo, mejorando la calidad del servicio, facilitando la instalación en el despliegue y en el alta de usuario, e incluso permitiendo la reducción de la potencia óptica a transmitir por parte del equipamiento activo OLT.

Por otra parte, el hecho de apostar por el diseño e instalación de una red FTTH viene determinado por la necesidad de ofrecer servicios de televisión, telefonía digital e Internet de ultra-banda ancha a precios competitivos. Cada día son más los usuarios que demandan los servicios anteriores -y muchos más derivados de los mismos-, de tal forma que los operadores se ven incapaces de ofrecerlos con la tecnología desplegada actualmente.

Soluciones como la ADSL2+ y otras similares, que ya alcanzan importantes velocidades de transmisión se quedan cortas ante servicios tales como la videoconferencia de alta calidad, la televisión de alta definición personal, los videojuegos *on-line*, etc. Estas soluciones evitan modificar el bucle al abonado, lo que se convierten en respuestas más económicas para el usuario final. Sin embargo, las redes ópticas FTTH apuestan por mejorar el bucle al abonado, aumentando la tasa de transmisión de bits, y mejorando la seguridad, el rendimiento y el mantenimiento, a precios más económicos.

La inclusión de materiales específicos para redes FTTH, así como la elección de todos y cada uno de los elementos pasivos del sistema se ha realizado de forma minuciosa para conseguir la mejor relación calidad-precio del sistema, innovando a nivel de diseño y adecuando la red a una comercialización más accesible para la sociedad.

Con este proyecto, se ha demostrado que el avance tecnológico en materia de redes no ha de estar reñido con el coste que supone su propio diseño e instalación. Prueba de ello es el actual proyecto, en el que el despliegue de 4 fincas con más de 700 usuarios potenciales de servicio implica una inversión menor a los 90.000 € en cifras reales, lo que supone un valor relativamente pequeño para las empresas del sector encargadas del despliegue de redes ópticas pasivas.

La implantación de redes de nueva generación sobre redes FTTH son cada vez mayores, y la aparición de empresas como modelo de operador neutro suponen una importante solución a la evolución de las mismas. Cada vez son más las empresas que se lanzan a este terreno, con importantes visiones de futuro a nivel tecnológico y económico.

Apéndice 1

Estándares de la fibra óptica

A lo largo de la evolución de la fibra óptica, se han ido especificando diferentes estándares internacionales que clasifican, definen y particularizan los distintos tipos de fibra óptica del mercado.

Para lograr rendimientos ópticos de acuerdo con cada aplicación, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) definió diversas normas que establecían los rendimientos de las fibras ópticas tanto monomodo como multimodo. Estas normas son todas las englobadas en el grupo ITU-T G.65x, y las más importantes relacionadas con la clasificación expuesta en el apartado anterior, son las que se muestran a continuación. También la EIA normalizó algunos tipos de fibra, como es el caso de la fibra multimodo 62.5/125 μm .

AP.1.1 Recomendación EIA-492: fibra multimodo tipo 62.5/125 μm

La norma EIA-492 [57] hace referencia a las fibras multimodo cuyo diámetro nominal es de 62.5 μm y revestimiento de 125 μm con índice de refracción gradual. El parámetro de atenuación para este tipo de fibra posee un valor típico de 0.8 dB/km a una longitud de onda de trabajo de 1310 nm.

Esta fibra se encuentra optimizada para una longitud de onda de trabajo de 1310 nm, aunque también posee buenas propiedades operativas en la banda de los 850 nm. La principal aplicación para las fibras definidas en esta recomendación es para redes de datos y FDDI.

AP.1.2 Recomendación ITU-T G.651: fibra multimodo tipo 50/125 μm

La norma ITU-T G.651 [58] hace referencia a las fibras multimodo cuyo diámetro nominal es de 50 μm y revestimiento de 125 μm con índice de refracción gradual. El parámetro de atenuación para este tipo de fibra posee un valor típico de 0.8 dB/km a una longitud de onda de trabajo de 1310 nm.

Esta fibra se encuentra optimizada para una longitud de onda de trabajo de 1310 nm, aunque también posee buenas propiedades operativas en la banda de los 850 nm. La principal aplicación para las fibras definidas en esta recomendación es para sistemas de transmisión de corta distancia.

AP.1.3 Recomendación ITU-T G.652: fibra monomodo estándar de dispersión cero o SMF

La norma ITUT-T G.652 [20] hace referencia a las fibras monomodo estándar SMF o de dispersión cero optimizada para una longitud de onda de trabajo de 1310 nm, aunque también puede ser utilizada en la región de los 1550 nm (aunque en este caso la fibra no está optimizada para trabajar en esta región).

La dispersión cromática típica definida por la norma ITU-T G.652 para una longitud de onda de trabajo de 1550 nm es superior a 17 ps/nm·km, y fija además el parámetro de atenuación del orden de 0.2 dB/km así como el parámetro PMD en el orden del 0.1 ps/km.

Esta fibra es la más desplegada comúnmente en cualquier tipo de instalación genérica que no requiera condiciones especiales. Compensa la elevada distorsión cromática con su elevada capacidad o alta tasa de transmisión de bits.

AP.1.4 Recomendación ITU-T G.653: fibra monomodo de dispersión desplazada o DSF

La norma ITUT-T G.653 [59] hace referencia a las fibras monomodo de dispersión desplazada o DSF, que poseen una dispersión cero en la longitud de onda de trabajo de 1550 nm, y un coeficiente de dispersión monótonamente incrementado con la longitud de onda. Esta fibra se encuentra optimizada para una longitud de onda de trabajo de 1550 nm, aunque también puede ser utilizada en la región de los 1310 nm sujeto a las restricciones de la recomendación.

La recomendación recoge también la capacidad que poseen estas fibras de funcionar en longitudes inferiores a 1460 nm y superiores a 1625 nm. En estos casos, los valores del coeficiente de dispersión cromática se especifican para soportar sistemas CWDM (*Coarse wavelength division multiplexing*) o multiplexación en longitud de onda ancha que no tengan desbalance significativo debido a efectos no lineales.

AP.1.5 Recomendación ITU-T G.654: fibra monomodo de pérdida minimizada o corte desplazado

La norma ITUT-T G.654 [60] hace referencia a aquellas fibras ópticas monomodo que poseen una longitud de onda de dispersión nula en la longitud de onda de trabajo de 1310 nm con parámetros de pérdida minimizada, pero optimizada para una longitud de onda operativa entre los 1500 y 1600 nm.

La minimización de las pérdidas se alcanza gracias a la utilización de un núcleo fabricado a partir de sílice puro. Sin embargo estas fibras poseen una dispersión

cromática alta en la ventana operativa de 1550 nm. Generalmente son diseñadas para uniones de fibra transoceánicas.

AP.1.6 Recomendación ITU-T G.655: fibra monomodo de dispersión modificada no nula o NZDSF

La norma ITUT-T G.655 [61] hace referencia a las fibras monomodo de dispersión desplazada no nula o NZDSF, es decir, describe una fibra monomodo con un coeficiente de dispersión cromático mayor que cero (en valor absoluto) pero próximo a él, a lo largo de longitudes de onda operativas mayores a 1530 nm.

La norma justifica la introducción de dispersión para reducir el crecimiento de los efectos no lineales perjudiciales en sistemas DWDM (*Dense wavelength division multiplexing*) o multiplexación en longitud de onda densa. Estas fibras soportar transmisiones a longitudes de onda operativas comprendidas entre los 1530 y 1625 nm.

AP.1.7 Recomendación ITU-T G.656: fibra monomodo de dispersión no nula para enlaces ópticos de banda ancha

La norma ITUT-T G.656 [62] define aquellas fibras ópticas para un funcionamiento entre 1460 y 1625 nm pero con una dispersión cromática no nula mayor que cero (en valor absoluto) pero próximo a él.

La norma justifica la introducción de dispersión para reducir el crecimiento de los efectos no lineales perjudiciales en sistemas DWDM y CWDM. Estas fibras soportar transmisiones a longitudes de onda operativas comprendidas entre los 1460 y 1625 nm.

AP.1.8 Recomendación ITU-T G.657: fibra monomodo insensible a las pérdidas por curvatura

La norma ITUT-T G.657 [63] define aquellas fibras ópticas que poseen niveles extremadamente bajos de atenuación producidas por curvaturas de la fibra. En general esta especificación describe un tipo de fibra óptica capaz de reducir la sensibilidad a la curvatura para poder ser utilizadas en transmisiones a una longitud de onda operativa comprendida entre los 1310 y 1625 nm, soportando transmisión CWDM.

A continuación se muestra una tabla comparativa con los datos más relevantes recogidos por los estándares de fibra ITU-T G.65x de los apartados anteriores.

TIA-492 FIBRA MULTIMODO 62.5/125	
Apertura Numérica	0,275 (tolerancia 0,015)
Perfil de índice de refracción	Parabólico
Índice de refracción	1,9%
Diámetro del núcleo	62,5 μm (tolerancia 3 μm)
Diámetro del revestimiento	125 μm (tolerancia 1 μm)
Recubrimiento de silicona	245 μm (tolerancia 10 μm)
Longitud de onda de aplicación	850 y 1310 nm
Atenuación a 850 nm	3 – 3,2 dB/km
Atenuación a 1310 nm	0,7 – 0,8 dB/km
Ancho de Banda a 850 nm	200 – 300 MHz·km
Ancho de Banda a 1310 nm	400 – 600 MHz·km

Figura 158: Características principales del estándar EIA-492

ITUT-T G.651 FIBRA MULTIMODO 50/125	
Apertura Numérica	0,18 – 0,24 (tolerancia 10 %)
Perfil de índice de refracción	Parabólico
Diámetro del núcleo	50 μm (tolerancia 3 μm)
Diámetro del revestimiento	125 μm (tolerancia 3 μm)
Recubrimiento de silicona	245 μm (tolerancia 10 μm)
Error de concentricidad	6%
Error de circularidad del núcleo	6%
Error de circularidad del revestimiento	2%
Atenuación a 850 nm	2,7 – 3 dB/km
Atenuación a 1310 nm	0,7 – 0,82 dB/km
Ancho de Banda a 850 nm	300 – 500 MHz·km
Ancho de Banda a 1310 nm	500 – 1000 MHz·km

Figura 159: Características principales del estándar ITU-T G.651

ITUT-T G.652 FIBRA MONOMODO ESTÁNDAR SMF	
Longitud de onda de corte	1180 – 1270 nm
Diámetro del campo modal	8 – 10 (tolerancia 10%)
Diámetro del revestimiento	125 μm (tolerancia 3 μm)
Recubrimiento de silicona	245 μm (tolerancia 10 μm)
Error de circularidad del revestimiento	2%
Error de concentricidad del campo modal	1 μm
Atenuación a 1310 nm	0,4 – 1 dB/km
Atenuación a 1550 nm	0,25 – 0,5 dB/km
Dispersión cromática 1285-1330 nm	3,5 ps/km·nm
Dispersión cromática 1270-1340 nm	6 ps/km·nm
Dispersión cromática 1550 nm	20 ps/km·nm

Figura 160: Características principales del estándar ITU-T G.652

ITUT-T G.653 FIBRA MONOMODO DSF	
Diámetro del campo modal	7 – 8,3 (tolerancia 10%)
Diámetro del revestimiento	125 μm (tolerancia 3 μm)
Recubrimiento de silicona	245 μm (tolerancia 10 μm)
Error de circularidad del revestimiento	2%
Error de concentricidad del campo modal	1 μm
Atenuación a 1310 nm	< 1 dB/km
Atenuación a 1550 nm	0,25 – 0,5 dB/km
Dispersión cromática 1525-1575 nm	3,5 ps/km·nm

Figura 161: Características principales del estándar ITU-T G.653

ITU-T G.654 FIBRA MONOMODO MÍNIMA ATENUACIÓN	
Longitud de onda de corte	1350 – 1600 nm
Diámetro del campo modal	10,5 μm (tolerancia 10%)
Diámetro del revestimiento	125 μm (tolerancia 3 μm)
Recubrimiento de silicona	245 μm (tolerancia 10 μm)
Error de circularidad del revestimiento	2%
Error de concentricidad del campo modal	1 μm
Atenuación a 1550 nm	0,22 dB/km
Dispersión cromática 1550 nm	20 ps/km·nm

Figura 162: Características principales del estándar ITU-T G.654

ITU-T G.655 FIBRA MONOMODO NZDSF	
Longitud de onda de corte	1260 nm
Diámetro del campo modal	8,4 μm (tolerancia 0,6 μm)
Diámetro del núcleo	6 μm
Diámetro del revestimiento	125 μm (tolerancia 1 μm)
Recubrimiento de silicona	245 μm (tolerancia 10 μm)
Error de circularidad del revestimiento	2%
Error de concentricidad del campo modal	1 μm
Atenuación a 1550 nm	0,22 – 0,3 dB/km
Dispersión cromática 1550 nm	4,6 ps/km·nm

Figura 163: Características principales del estándar ITU-T G.655

AP.1.9 Otros estándares de fibra óptica

Aparte de los estándares anteriores regularizados por la ITU, existen otros estándares que originan diferentes clasificaciones de la fibra óptica. Así pues, destacan dos clasificaciones de fibra óptica estandarizadas según dos entidades internacionales diferentes: estándares según la Comisión Electrotécnica Internacional IEC (*International Electrotechnical Commission*), y según la Organización Internacional para la Estandarización ISO (*International Organization for Standardization*).

AP.1.9.1 Estándares IEC 60793-2-50

En general, el estándar IEC 60793-2-50 [64] especifica siete tipos diferentes de fibras ópticas monomodo que reciben la nomenclatura de Tipo Bx, y cuya equivalencia con los estándares definidos por la ITU-T G.65x son los expuestos a continuación:

- **Tipo B1.1:** norma equivalente a la recomendación ITU-T G.652
- **Tipo B1.2:** norma equivalente a la recomendación ITU-T G.654
- **Tipo B1.3:** norma equivalente a la recomendación ITU-T G.652.c
- **Tipo B2:** norma equivalente a la recomendación ITU-T G.653

- **Tipo B4:** norma equivalente a la recomendación ITU-T G.655
- **Tipo B5:** norma equivalente a la recomendación ITU-T G.656
- **Tipo B6:** norma equivalente a la recomendación ITU-T G.657

Existen distintas diferencias fundamentales entre unos tipos de fibra y otros, aunque todas se encuentran relacionadas con ciertas propiedades de las fibras sujetas al proceso de fabricación y, en definitiva, a la aplicación final de la fibra. La diferencia más importante entre unos tipos de fibra y otros es el diámetro del campo modal. A continuación se muestra una tabla con los diámetros del campo modal (MFD) de las diferentes fibras ópticas en función de la normativa ITU-T G.65x y IEC 60793-2-50 Bx.

IEC 60792-2-50	ITU-T G.65x	MFD mínimo (μm)	MFD máximo (μm)	Tolerancia de MFD (μm)	Longitud de onda (nm)
Tipo B1.1	G.652	8.6	9.5	0.6	1310
Tipo B1.2	G.654	9.5	10.5	0.7	1550
Tipo B1.3	G.652.c	8.6	9.5	0.6	1310
Tipo B2	G.653	7.8	8.5	0.8	1550
Tipo B4	G.655	8.0	11.0	0.7	1550
Tipo B5	G.656	7.0	11.0	0.7	1550
Tipo B6	G.657	8.6	9.5	0.4	1310

Figura 164: Características principales del estándar IEC 60792-2-50

AP.1.9.2 Estándares ISO 11801 e ISO 24702

También existe una clasificación en función de otra normativa estandarizada por el sistema ISO 11801 [65] y la ISO 24702 [66]. Según estas recomendaciones, las fibras se clasifican en cinco tipos diferentes en función de su ancho de banda. La clasificación posee una nomenclatura del tipo OMx para fibras ópticas multimodo, y OSx para fibras ópticas monomodo. A continuación se muestra la clasificación:

- **OM1.** Normalizada según la recomendación ISO 11801, establece las propiedades físicas y mecánicas de las fibras ópticas multimodo de 62.5/125 μm, capaces de soportar hasta 1 Gbps (Gigabit Ethernet) en transmisión, utilizando diodos LED como emisores.
- **OM2.** Normalizada según la recomendación ISO 11801, establece las propiedades físicas y mecánicas de las fibras ópticas multimodo de 50/125 μm, capaces de soportar hasta 1 Gbps (Gigabit Ethernet) en transmisión, utilizando diodos LED como emisores.
- **OM3.** Normalizada según la recomendación ISO 11801, establece las propiedades físicas y mecánicas de las fibras ópticas multimodo de 50/125 μm,

capaces de soportar hasta 10 Gbps (10Gigabit Ethernet a 300 m de distancia) en transmisión, utilizando diodos láser como emisores.

- **OS1.** Normalizada según la recomendación ISO 11801, establece las propiedades físicas y mecánicas de las fibras ópticas monomodo de 8/125 μm , capaces de soportar decenas de Gbps (Gigabit Ethernet) en transmisión a distancias superiores a 100 km, utilizando diodos láser como emisores.
- **OS2.** Normalizada según la recomendación ISO 24702, establece las propiedades físicas y mecánicas de las fibras ópticas monomodo de 8/125 μm de bajo pico de agua para espectro extendido de longitud de onda, capaces de soportar decenas de Gbps (Gigabit Ethernet) en transmisión a distancias superiores a 600 km, utilizando diodos láser como emisores.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre los diferentes tipos de fibra óptica según la clasificación normalizada de la ISO, tanto para fibra OM como para fibras OS.

Categoría	Longitud de onda (nm)	Máxima atenuación (dB/km)	Ancho de banda modal mínimo (MHz·km)	
			Emisión LED	Emisión LASER
OM1	850	3.5	200	No especificado
	1310	1.5	500	No especificado
OM2	850	3.5	500	No especificado
	1310	1.5	500	No especificado
OM3	850	3.5	1500	2000
	1310	1.5	500	No especificado
OS1	1310	1.0	No especificado	$40 \cdot 10^3$
	1383	No especificado	No especificado	$40 \cdot 10^3$
	1550	1.0	No especificado	$40 \cdot 10^3$
OS2	1310	0.4	No especificado	$100 \cdot 10^3$
	1383	0.4	No especificado	$100 \cdot 10^3$
	1550	0.4	No especificado	$100 \cdot 10^3$

Figura 165: Características principales de los estándares ISO 11801 e ISO 24702

Apéndice 2

Parámetros de las fibras ópticas

A lo largo del siguiente apéndice, se desarrollará de forma minuciosa los diferentes parámetros de las fibras que las caracterizan y clasifican. Existen dos grupos de parámetros, y son los parámetros estructurales y los parámetros de transmisión. Todos ellos establecen las condiciones en las que se puede realizar la transmisión de información.

AP.2.1 Parámetros estructurales

Los parámetros estructurales son aquellos relacionados con la geometría y estructura propia de cada fibra óptica. Estos parámetros determinan y caracterizan los tipos de fibras ópticas existentes en el mercado, de tal forma que la clasificación de las fibras depende directamente de ellos. Existen muchos y muy variados tipos de parámetros que caracterizan las fibras aunque los más importantes son los que se detallan a continuación.

AP.2.1.1 Perfil de índice de refracción

Se denomina perfil de índice de refracción al desarrollo del índice de refracción sobre la sección transversal de la fibra óptica. El perfil del índice para las fibras multimodo es gradual parabólico, mientras que en el caso de las fibras monomodo el perfil del índice es una variable entre fabricantes y no existe uniformidad de criterios. Esto se debe a una propiedad que tienen las fibras monomodo capaces de modificar la longitud de onda para la cual se tiene una dispersión cromática nula [35].

Variando el perfil del índice de refracción se obtienen las fibras ópticas con dispersión cromática desplazada a 1550 nm del tipo ITU-T G.653 y las de dispersión desplazada no nula ITU-T G.655, ya comentadas en el apartado de clasificación de las fibras ópticas. Típicamente se trata de perfiles triangulares o rectangulares [36].

En la figura 67 del capítulo 3 se pueden visualizar las gráficas del perfil de índice de refracción en función de la distancia radial de la fibra, tanto para fibras monomodo como para fibras multimodo.

AP.2.1.2 Dimensiones del núcleo y del revestimiento

Tanto las dimensiones del núcleo como del revestimiento de la fibra se definen mediante el diámetro de las mismas, con el cual se determina el tipo de propagación ya sea monomodo o multimodo.

Las fibras ópticas multimodo para telecomunicaciones poseen normalizado el diámetro del núcleo y del revestimiento en 50 μm (62,5 μm en muchos casos) y 125 μm con cierto nivel de tolerancia permitida para cada una de ellas. Estas tolerancias hacen referencia a los errores en la circularidad de ambas capas, siendo del 6% para el caso del núcleo y del 2,4% para el caso del revestimiento. Existe además un error de concentricidad entre núcleo y revestimiento del orden 6% [35].

En cuanto a las fibras ópticas monomodo para telecomunicaciones poseen también normalizado el diámetro del núcleo y del revestimiento. Sin embargo el núcleo suele tener valores oscilantes entre los 8 y 10 μm , mientras que para el caso del revestimiento es de 125 μm como en el caso de las multimodales. Los valores del error de circularidad para el revestimiento y del error de concentricidad entre núcleo y revestimiento, poseen los mismos valores que en caso de fibras ópticas multimodo [36].

A parte del diámetro y de las tasas de errores comentadas anteriormente, en el caso de las fibras ópticas monomodo también se define otro tipo de parámetro: el diámetro del campo modal, que se detalla a continuación.

AP.2.1.3 Diámetro del campo modal

Se denomina diámetro del campo modal lejano o cercano -de acuerdo con el método de medida del mismo-, al valor del diámetro del campo emitido en el extremo de la fibra óptica monomodo, e indica cómo se produce la distribución geométrica de la luz en el modo propagado

Así pues, este valor reemplaza al diámetro del núcleo real por otro efectivo y suele estar comprendido entre 6 y 9 μm como valor nominal, dependiendo de la fibra óptica. Estos valores poseen además una tolerancia del orden del 10%, como tasa de error de circularidad [36].

AP.2.1.4 Apertura numérica

El concepto de apertura numérica se encuentra directamente relacionado al cono de aceptación de una fibra óptica, que ajusta el valor del número de rayos capaces de entrar en el núcleo de transmisión de una fibra óptica.

Al incidir un rayo luminoso sobre una superficie de separación entre dos medios de distinto índice de refracción (en este caso el núcleo y el revestimiento de la fibra), parte del rayo incidente se refleja al exterior y otra parte se refracta. Dependiendo de las

constantes de refracción de los materiales, existe un ángulo máximo de incidencia de la luz sobre el extremo de la fibra para el cual toda la luz incidente se propaga. Este ángulo se denomina cono de aceptación y su seno se conoce como apertura numérica (AN) [35].

Así pues de acuerdo a la estructura de la fibra el índice del núcleo n_1 es ligeramente superior al índice del revestimiento n_2 y su ángulo crítico o límite viene determinada por la siguiente expresión matemática según la ecuación (57) [36]:

$$\text{sen } \theta_{i\text{lim}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (58)$$

Para poder acoplar al núcleo un rayo luminoso procedente del exterior de la fibra, es necesario tener en cuenta que el índice de refracción del aire es $n_0 = 1$. Por lo tanto el ángulo entre el rayo luminoso y el eje de la fibra (donde se encuentra el núcleo) se rige de acuerdo a la ley de refracción enunciada en la ecuación (51):

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2 \quad (59)$$

Particularizando la expresión anterior para el caso del aire y el núcleo, quedaría de la siguiente forma:

$$n_0 \cdot \text{sen } \theta_{\text{incidente}} = n_{\text{núcleo}} \cdot \text{sen } \theta_{\text{reflejado}} \quad (60)$$

A continuación se muestra un gráfico explicativo del cono de aceptación, a partir del cuál se calculará la expresión de la apertura numérica [35].

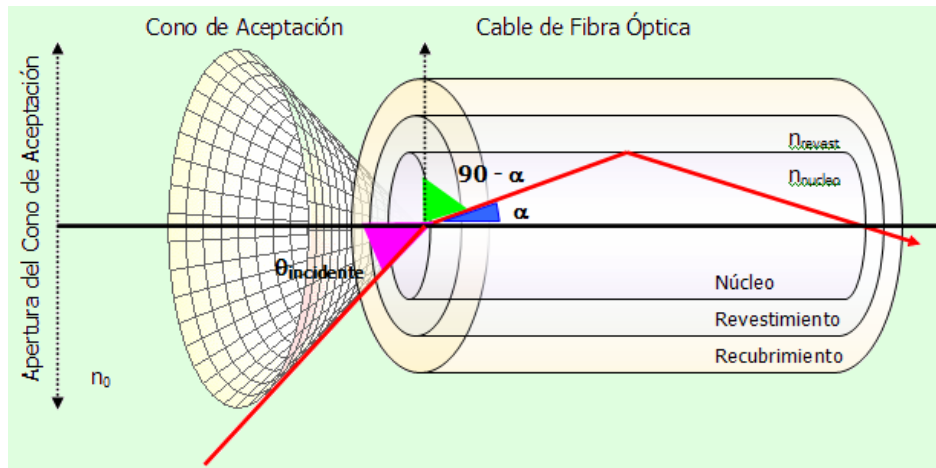


Figura 166: Concepto de Apertura Numérica

Redefiniendo la ecuación (60) en función de los parámetros del gráfico anterior, quedaría de la siguiente manera:

$$n_0 \cdot \text{sen } \theta_{\text{incidente}} = n_{\text{núcleo}} \cdot \text{sen}(90 - \alpha) \quad (61)$$

Teniendo en cuenta que $n_0 = 1$ y aplicando trigonometría al valor del $\sin(90 - \alpha) = \cos \alpha$ se obtendría la siguiente expresión:

$$\sin \theta_{\text{incidente}} = n_{\text{núcleo}} \cdot \cos \alpha \quad (62)$$

considerando que:

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \rightarrow \cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \quad (63)$$

se puede sustituir la ecuación (63) en la (62), obteniendo la siguiente expresión:

$$\sin \theta_{\text{incidente}} = n_{\text{núcleo}} \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} \quad (64)$$

Si además esta expresión debe cumplir la condición del ángulo límite o crítico, se sustituye el valor de la ecuación (58) sobre la anterior, obteniéndose la expresión siguiente:

$$\sin \alpha = \frac{n_{\text{revestimiento}}}{n_{\text{núcleo}}} \quad (65)$$

Luego la expresión final quedaría de la siguiente forma [36]:

$$\sin \theta_{\text{incidente}} = \sqrt{n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{revestimiento}}^2} \quad (66)$$

De la ecuación anterior se pueden extraer dos definiciones intrínsecamente relacionadas. Por un lado el máximo ángulo de acoplamiento de $\theta_{\text{incidente}}$ máximo se denomina ángulo de aceptación del conductor de la fibra óptica, y es únicamente función de los índices de refracción $n_{\text{núcleo}}$ y $n_{\text{revestimiento}}$. Y por otra parte, al seno del ángulo de aceptación se le denomina apertura numérica (AN) del conductor de la fibra óptica, y es la expresión matemática (66).

El valor de la apertura numérica se encuentra normalizado en el entorno de 0,2 y tolerancia 10% para fibras ópticas multimodo de índice gradual 50/125 μm (ITU-T G.651). Sin embargo, esta norma no especifica ningún valor de apertura numérica para el caso de fibras ópticas monomodo [58].

AP.2.1.5 Longitud de onda de corte

La longitud de onda de corte es la mínima longitud de onda que determina que la fibra óptica transmita en un solo modo de propagación únicamente, teniendo en cuenta que el diámetro máximo del núcleo de una fibra monomodo depende de la longitud de onda de transmisión.

Si se desea que sólo sea transmitido un único modo de propagación en un sistema de comunicación, se debe estar seguro que la longitud de la onda de transmisión sea mayor que la longitud de la onda de corte. De hecho en la práctica las fibras son diseñadas con un ángulo de corte significativamente menor que la longitud de onda en la cual se encuentra diseñada para funcionar. Así por ejemplo, una fibra de modo simple para ser usada en $1,3 \mu\text{m}$ tendrá un ángulo de corte inferior a los $1,25 \mu\text{m}$ [35].

Las fibras monomodo siempre permanecen siendo monomodos para longitudes de onda de operación mayores a la longitud de onda de corte. Así una fibra cuya especificación es para trabajar a una longitud de corte λ_c también será monomodo para cualquier longitud de onda de trabajo que cumpla $\lambda_t \geq \lambda_c$.

Sin embargo, no serán monomodo aquellas fibras cuyas longitudes de onda de trabajo sean inferiores a la longitud de onda de corte, es decir que cumplan $\lambda_t < \lambda_c$. si la longitud de onda comienza a decrecer por debajo de la longitud de onda de corte, primeramente se obtendrá un segundo modo de transmisión y según siga disminuyendo el valor de la longitud de onda de trabajo se irán adicionando nuevos modos. Los modos extras se propagarían simultáneamente interfiriéndose unos con otros y con los modos primarios, causando problemas de solapamiento y pérdida de información.

AP.2.2 Parámetros de transmisión

Los parámetros de transmisión son aquellos relacionados con la transmisión de señales a través de fibra óptica. Existen también muchos tipos de parámetros que caracterizan las fibras y en función de su naturaleza y efectos sobre la fibra se clasifican en dos grandes grupos: parámetros de atenuación y parámetros de dispersión. A continuación se muestra una tabla resumen con la clasificación de los parámetros de transmisión [30] [35] [36]:

Parámetros de transmisión	Atenuación	Pérdidas extrínsecas	Por curvatura Por conexión y empalme Otras
		Pérdidas intrínsecas	Pérdidas inherentes / fabricación Pérdidas UV e IR Reflexión de Fresnel Scattering de Rayleigh
	Dispersión	Dispersión Modal	
		Dispersión Polarización de Modo PMD	
		Dispersión cromática	Dispersión material Dispersión guía de onda

Figura 167: Concepto de Apertura Numérica

AP.2.2.1 Atenuación

La atenuación de la luz en una fibra óptica se produce como consecuencia de varios efectos y se pueden clasificar en pérdidas extrínsecas y pérdidas intrínsecas.

AP.2.2.1.1 Pérdidas extrínsecas

Este tipo de pérdidas se deben a factores extrínsecos a la naturaleza de las fibras, como lo son los parámetros de curvatura o de empalme entre fibras ópticas. A consecuencia de estos se producen atenuaciones en la luz que se transmite a lo largo de la fibra, y sus efectos más importantes se detallan a continuación.

▪ *Pérdidas por curvatura*

Las pérdidas producidas por la curvatura externa de la fibra ocurren en todas las curvas de una fibra óptica debido al cambio del ángulo de incidencia en la frontera núcleo-revestimiento. Siempre que la fibra se somete a una curvatura por bobinado, tendido o cualquier otro proceso de acopio o instalación se origina una atenuación adicional por el hecho de que el interfaz núcleo-revestimiento deja de ser geoméricamente uniforme.

Cuando se rompe la uniformidad en dicho interfaz, la luz se refleja en algunos puntos con ángulos diferentes de los inicialmente calculados, por lo que deja de verificarse en ellos el principio de reflexión total y en consecuencia, se produce una fuga de modos o rayos hacia el revestimiento.

No obstante, como esta atenuación adicional varía exponencialmente con el radio de curvatura, estas pérdidas son inapreciables hasta que se sobrepasa una curvatura crítica. Por tanto, más que reconocer la variación de las pérdidas por la curvatura interesa conocer el radio de curvatura mínimo posible para un cable de fibras, y se establece en unas diez veces el diámetro exterior del cable [36]:

$$Radio_{curvatura}|_{\max} = 10 \cdot D_{cable} \quad (69)$$

El estudio de las consecuencias de estas curvaturas es muy complejo, particularmente en fibras monomodo por lo que tan sólo cabe destacar 2 observaciones importantes [30]:

- aumentan considerablemente cuando es menor del 0,2%.
- se presentan especialmente al trabajar en 3ª ventana a 1550 nm.

Sin embargo, éstas no son las únicas curvaturas que se pueden producir en un cable óptico. Las irregularidades localizadas a lo largo de la fibra entre el núcleo y el

revestimiento, las fluctuaciones del diámetro (error de elipticidad) y las tortuosidades del eje de la fibra (error de concentricidad) dan origen a lo que se conoce como microcurvaturas. Este fenómeno puede ser provocado por esfuerzos durante la manufactura e instalación de la fibra, así como por variaciones dimensionales de los materiales del cable debido a los cambios de temperatura.

Las microcurvaturas provocan pérdidas que presentan la particularidad de que afectan a toda la banda de información y varían poco con la longitud de onda. Por otra parte, sólo se origina atenuación cuando las irregularidades periódicas están separadas menos de una longitud determinada L . Esta longitud es directamente proporcional al radio a del núcleo, e inversamente proporcional a la diferencia relativa de índices I , según la expresión matemática siguiente [36]:

$$L = \frac{4a}{I} \quad (70)$$

Según la expresión anterior se observa que una diferencia de índices demasiado pequeña puede ser causa de pérdidas por microcurvaturas, pues al aumentar L las irregularidades pueden distar entre sí longitudes menores que dicha longitud crítica.

En la fibra, las irregularidades periódicas motivan en general un trasvase de potencia de unos modos de propagación a otros, y cuando el espaciamiento es menor que L , la potencia guiada se acopla a modos de radiación que se escapan del núcleo, originándose de este modo la atenuación. Así por ejemplo, en una fibra con radio 2,5 μm y $\delta = 0,01$ se producen pérdidas de radiación cuando existen irregularidades periódicas a 1 mm. A este tipo de pérdidas se les denomina pérdidas *Mie*, para diferenciarlas de las *Rayleigh* originadas por efectos intrínsecos a la fibra y de menor tamaño que la longitud de onda [35].

Las pérdidas por microcurvaturas se pueden reducir hasta en un 30% adoptando las siguientes medidas paliativas sobre la fibra:

- aumentar la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento
- aumentar la sección de la fibra
- imbuir la fibra en un plástico blando (de baja constante de *Young*), y recubrirla posteriormente con un elemento de alta constante de *Young*, que absorberá los esfuerzos con una baja elongación.

▪ *Pérdidas por conexión y empalme*

Las pérdidas por conexión y empalme ocurren en todos los empalmes de fibra óptica. Los empalmes mecánicos son los que tiene generalmente mayores pérdidas, y generalmente suponen una pérdida de entre 0,1 y 0,2 dB [35].

Los empalmes por fusión entre fibras poseen pérdidas muy bajas, generalmente menores a 0,15 dB. Estas pérdidas se pueden atribuir a un gran número de factores, incluyendo un mal corte de la fibra, desalineamiento en los núcleos de la fibra, burbujas

de aire, contaminación, desadaptación del índice de refracción, desadaptación del diámetro del núcleo, etc. [35]

Por otra parte las pérdidas de los conectores de fibra óptica están frecuentemente en el rango de entre 0,3 y 1,5 dB y dependen en gran medida del tipo de conector usado. A lo largo del presente documento se describirán los tipos de conectores más comunes de fibra óptica así como las pérdidas introducidas por cada uno de ellos [35].

En el caso de las fibras ópticas monomodo estas pérdidas vienen determinadas por el desajuste del radio de campo modal, cuya definición se explica en el apartado anterior. De esta forma, la unión entre dos fibras o una fibra y un conector, implica que ambas posean diferencias entre los radios del campo modal, lo que se traduce en pérdidas en la señal.

Existe una expresión matemática que caracteriza las pérdidas por conexión y empalme y es la que se muestra a continuación [36]:

$$Perdidas_{union}|_{SM} = -10 \log \frac{4}{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2} + \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2} \quad (71)$$

donde ω_1 y ω_2 son los radios de campo modal de las fibras transmisora y receptora.

A continuación se muestra una gráfica del campo modal de una fibra óptica monomodo [30].

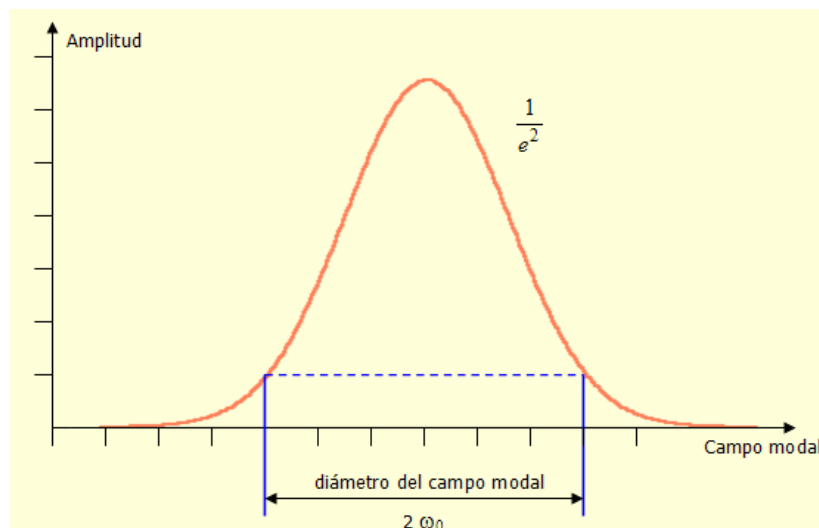


Figura 168: Diámetro del campo modal de una fibra monomodo

En el caso de las fibras ópticas multimodo las pérdidas de unión y conectores vienen determinadas por el desajuste de la apertura numérica, el desajuste del diámetro del núcleo y el desajuste del perfil del índice de refracción del núcleo de las fibras, cuyas definiciones se explican en el apartado anterior. Cualquier desavenencia entre estas magnitudes en las fibras involucradas, provocará una pérdida de potencia de la señal [36].

A continuación se detallan gráficamente las pérdidas por uniones de fibras multimodo más típicas en este tipo de cables.

- **Pérdidas por desajuste de la apertura numérica**

Este tipo de pérdidas se produce como consecuencia de la unión de dos fibras (o fibra y conector) cuyo núcleo poseen diferente valor de apertura numérica. Cuando se produce la fusión de dos fibras con diferentes aperturas numéricas, parte de los haces de luz procedente de la fibra transmisora se pierden por reflexión externa y no logran continuar transmitiéndose a lo largo de la fibra receptora, lo que implica una pérdida en la potencia de la señal transmitida, tal y como se indica en la figura 169 [30]:

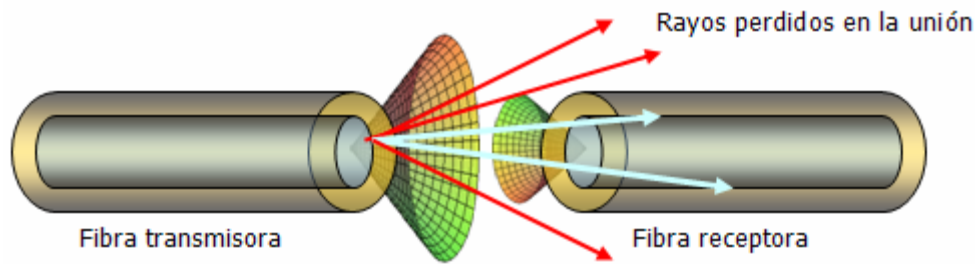


Figura 169: *Pérdidas por desajuste en apertura numérica*

Estas pérdidas se pueden caracterizar matemáticamente a través de la siguiente expresión [36]:

$$Perdidas_{AN}|_{MM} = \begin{cases} -20 \log \frac{AN_2}{AN_1} & \text{para } AN_2 < AN_1 \\ 0 & \text{para } AN_2 \geq AN_1 \end{cases} \quad (72)$$

Donde AN_1 y AN_2 representan las aperturas numéricas de las fibras transmisora y receptora respectivamente.

- **Pérdidas por desajuste del diámetro del núcleo**

Este tipo de pérdidas se produce como consecuencia de la unión de dos fibras (o fibra y conector) cuyo núcleo poseen diferente radio. Cuando se produce la fusión de dos fibras con valores diferentes de diámetro, parte de los haces de luz procedente de la fibra transmisora se pierden por reflexión externa y no logran continuar transmitiéndose a lo largo de la fibra receptora, lo que implica una pérdida en la potencia de la señal transmitida, tal y como se indica en la figura 170 [30]:

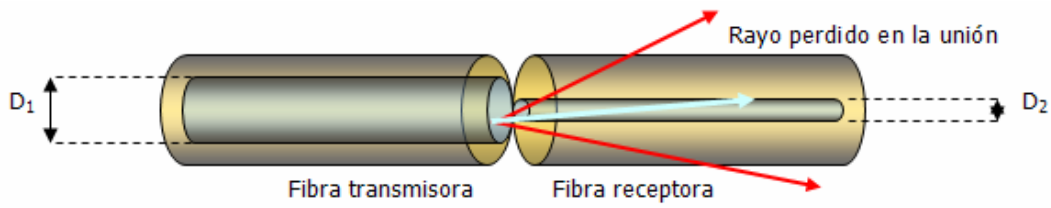


Figura 170: Pérdidas por desajuste en el diámetro del núcleo

Estas pérdidas se pueden caracterizar matemáticamente a través de la siguiente expresión [36]:

$$Perdidas_D|_{MM} = \begin{cases} -20 \log \frac{D_2}{D_1} & \text{para } D_2 < D_1 \\ 0 & \text{para } D_2 \geq D_1 \end{cases} \quad (73)$$

Donde D_1 y D_2 representan los diámetros del núcleo de las fibras transmisora y receptora respectivamente.

- **Pérdidas por desajuste del perfil**

Este tipo de pérdidas se produce como consecuencia de la unión de dos fibras (o fibra y conector) cuyo núcleo poseen diferente perfil de índice de refracción. Cuando se produce la fusión de dos fibras con perfil de índice de refracción distinto, parte de los haces de luz procedente de la fibra transmisora se pierden por reflexión externa y no logran continuar transmitiéndose a lo largo de la fibra receptora, lo que implica una pérdida en la potencia de la señal transmitida. En la figura 171 se muestra una gráfica del desajuste del perfil del índice de refracción del núcleo [30].

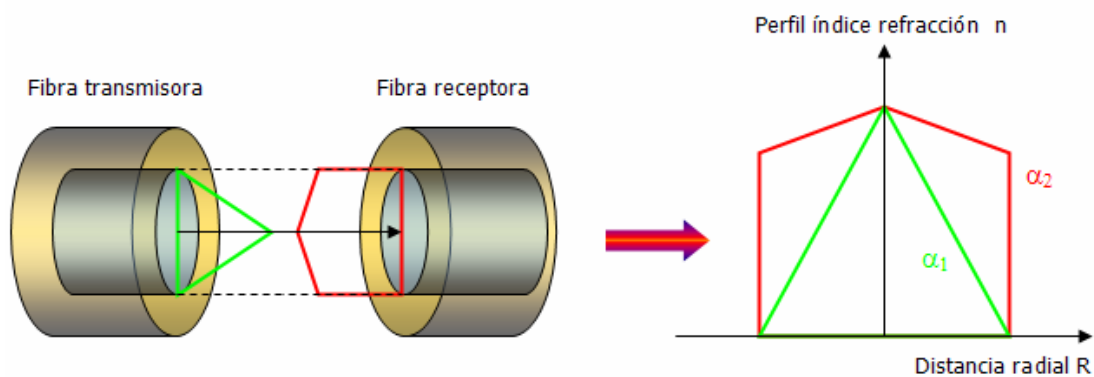


Figura 171: Pérdidas por desajuste del perfil

Estas pérdidas se pueden caracterizar matemáticamente a través de la siguiente expresión [36]:

$$Perdidas_n|_{MM} = \begin{cases} -20 \log \frac{\alpha_2(\alpha_1 + 2)}{\alpha_1(\alpha_2 + 2)} & \text{para } \alpha_2 < \alpha_1 \\ 0 & \text{para } \alpha_2 \geq \alpha_1 \end{cases} \quad (74)$$

Donde α_1 y α_2 representan los perfiles del índice de refracción del núcleo de las fibras transmisora y receptora respectivamente.

- **Otras pérdidas extrínsecas de la fibra**

Cabe destacar algunas pérdidas menos importantes en cuanto a atenuación introducida, pero muy habituales durante el proceso de instalación o a causadas por procesos climáticos y a la fatiga estática provocada por el tendido, que aumentan las pérdidas acortan la vida de la fibra. Para resolver estos problemas existen dos soluciones de carácter general:

- Aplicar sobre el recubrimiento primario una sustancia rígida (nylon) en forma de segundo recubrimiento ceñido.
- Colocar la fibra con su primer revestimiento dentro de un segundo revestimiento holgado, rellenando el espacio intermedio con un medio viscoso, como el petrolato.

Ambas alternativas presentan sus respectivas ventajas: la primera muestra una buena estabilidad en un amplio rango de temperaturas; y la segunda presenta un incremento de pérdidas despreciable durante el cableado. En el caso de cables submarinos ambas soluciones pueden ser idóneas.

Por último, y en lo referente al envejecimiento de la fibra, cabe resaltar que se produce en determinadas condiciones de tensión permanente o cuando la tensión del tendido excede de determinada fracción de la permanente.

AP.2.2.1.2 Pérdidas intrínsecas

Este tipo de pérdidas se deben a factores intrínsecos a la naturaleza de las fibras, y por tanto propios de la fabricación y funcionamiento operacional de las mismas. Así por ejemplo, las pérdidas intrínsecas estudian las atenuaciones producidas por la composición molecular de la fibra, las resultantes de su fabricación, las operacionales de la fibra, reflexiones, etc. A continuación se detallarán las pérdidas intrínsecas más importantes de las fibras ópticas.

- ***Pérdidas inherentes a la fibra durante el proceso de fabricación***

Este tipo de pérdidas no se pueden eliminar por completo durante el proceso de fabricación de la fibra y se deben a las impurezas en el vidrio compuesto y a la absorción de la luz a nivel molecular. Esta absorción es causada principalmente por contaminantes del vidrio tales como iones de hidroxilo OH^- u otros de origen metálico, como son el hierro, el cromo, el cobalto o el níquel [30].

Las impurezas metálicas originan una pérdida del orden de 1 dB/km si su concentración es de una parte por millón, pero al ser relativamente fácil su control en el proceso de fabricación se puede reducir al mínimo [30].

En cambio, las del tipo hidroxilo presentes por deposición de partículas de vapor de agua durante el proceso de fabricación de la fibra, no son fácilmente controlables, y a 2720 nm se produce resonancia de la estructura atómica de los iones con la del sílice, transfiriendo los fotones su energía a los iones OH^- . Este fenómeno produce tres picos adicionales de pérdidas, correspondientes a los tres primeros armónicos de esa frecuencia en longitudes de onda definidas [36].

Durante el proceso de fabricación de la fibra se debe mantener los valores de tolerancia en la precisión, ya que las irregularidades durante este proceso pueden dar lugar a pérdidas de rayos luminosos, y por tanto de pérdida de señal e información. Hoy en día los métodos de fabricación de fibra consideran que las impurezas iónicas no deben exceder de 30 partes por cada cien mil millones. La amplitud del pico de absorción OH^- no excede nunca de 1 dB/km, habiéndose conseguido valores de 0,04 dB/km con el método VAD [35].

- ***Absorción por rayos UV e IR: Ventanas de operación de la fibra óptica***

Este mecanismo de pérdidas se debe a la interacción existente entre los fotones de la luz que viajan por la fibra y las moléculas que componen el núcleo. La energía fotónica se cede en parte a las moléculas de sílice que van encontrando los fotones en su camino, produciendo vibraciones en las mismas.

La absorción debida a la componente de radiación ultravioleta (UV) de la luz transmitida decrece exponencialmente con la longitud de onda, y es casi despreciable a partir de los 1000 nm. La absorción debida a los rayos infrarrojos (IR) se origina por las vibraciones entre átomos de silicio y oxígeno, creciendo exponencialmente con la longitud de onda, pero no es apreciable hasta los 1400 nm [30].

Por tanto, existen ciertas longitudes de onda en las que es más conveniente transmitir la señal de luz que otras, dado que los índices de atenuación o absorción crecen o decrecen en función de éstas. Es por ello que las transmisiones de luz por fibra se concentran en torno a tres longitudes de onda de operación denominadas ventanas. Las ventanas operacionales de la fibra óptica indican la longitud de onda central de la fuente luminosa que se utiliza para transmitir la información a lo largo de la fibra. La utilización de una ventana u otra determina parámetros tan importantes como la atenuación que sufrirá la señal transmitida por kilómetro.

Los primeros sistemas de fibra óptica operaban con una longitud de onda muy corta situada en torno a los 850 nm, denominada así debido a las fuentes y detectores de luz utilizados en la transmisión. A esta franja de funcionamiento se le denomina 1ª ventana operacional [36].

Las fuentes y detectores de luz actuales, permiten operar en longitudes de onda mayores, generalmente en 1310 y 1550 nm y se denominan longitudes de onda larga. A estas franjas de funcionamiento se les denomina 2ª y 3ª ventana de operación respectivamente. La 3ª ventana se utiliza únicamente para transmisión sobre fibra óptica monomodo, dado que es la que menor atenuación introduce en la señal a transmitir [36].

A continuación se muestra en la figura 172 las ventanas de funcionamiento de las fibras así como el rango de operación de cada una de ellas [30].

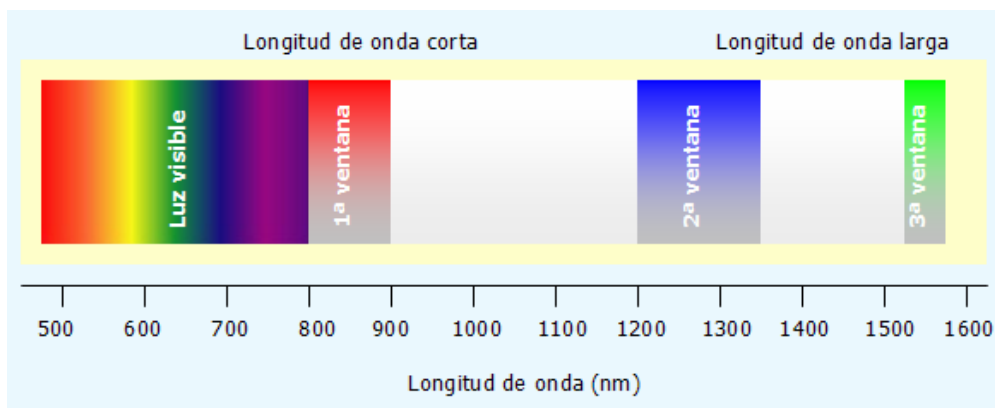


Figura 172: Ventanas operativas de la fibra óptica

▪ Reflexión de Fresnel

Este tipo de pérdidas se produce en cualquier frontera de un medio donde cambie el índice de refracción. De esta forma, cuando se produce un salto o variación del índice de refracción en el interfaz de unión entre fibras, una pequeña proporción de luz se suele reflejar hacia la fibra transmisora, y por tanto evitando su entrada en el núcleo de la fibra receptora. Gráficamente, se puede representar de manera sencilla según la figura 173 [35].

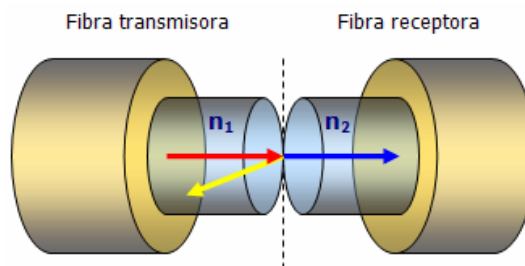


Figura 173: Reflexión de Fresnel

Estas pérdidas se pueden caracterizar matemáticamente a través de la siguiente expresión [36]:

$$Pérdidas_{Fresnel} = -10 \log(1 - r)^2 = -20 \log(1 - r) \quad (75)$$

Donde r es la reflectividad, que viene determinada por la siguiente ecuación [36]:

$$r = \left(\frac{n_1 - n_m}{n_1 + n_m} \right)^2 \quad (76)$$

Siendo n_1 el índice de refracción del núcleo de las fibras transmisora y receptora, y n_m el índice de refracción del medio existente entre ellas.

▪ *Dispersión de Rayleigh (o Scattering de Rayleigh)*

Este tipo de pérdidas se produce cuando la luz colisiona en su camino con partículas extrañas al medio continuo por el que se propaga, cuyo diámetro es considerablemente menor que la longitud de onda de la señal transmitida [30].

Si el tamaño de las partículas es mayor que la longitud de onda, la luz no se separa y todas las longitudes de onda son dispersadas. Para que la luz sea dispersada, el tamaño de las partículas debe ser similar o menor que la longitud de onda.

Por tanto, el grado de dispersión de Rayleigh que sufre un rayo de luz depende del tamaño de las partículas y de la longitud de onda de la luz, en concreto, del coeficiente de dispersión. Este fenómeno de difracción de la luz ocurrido en el núcleo de la fibra, absorbe parte del espectro energético de la señal y produce una pérdida de energía que decrece exponencialmente con la cuarta potencia de la longitud de onda, según la siguiente expresión matemática [36]:

$$Pérdidas_{Rayleigh} = K / \lambda^4 \quad (77)$$

El coeficiente de dispersión de Rayleigh para un grupo de partículas es el número de partículas por unidad de volumen N veces la sección transversal. La expresión matemática de la sección transversal de la dispersión de Rayleigh viene determinada por la siguiente ecuación [36]:

$$\sigma_{Rayleigh} = \frac{2\pi^5}{3} \cdot \frac{d^6}{\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \quad (78)$$

La difracción de luz por partículas mayores a un décimo de la longitud de onda se explica con la teoría de Mie, que es una explicación más general de la difusión de radiación electromagnética.

AP.2.2.2 Dispersión

La dispersión que afecta al ancho de banda en la transmisión de señales ópticas se puede subdividir en tres categorías: dispersión modal, dispersión por polarización del modo y dispersión cromática, que se detallan a continuación.

AP.2.2.2.1 Dispersión modal

La dispersión modal, es también conocida como dispersión multimodo, afecta sólo a aquellas fibras con varios modos de propagación (fibras multimodo) y está originada por los diferentes caminos o modos que sigue un haz de la luz de fibra, dando como resultado que los diferentes rayos de luz recorran distancias diferentes y lleguen al otro extremo de la fibra en instantes de tiempos distintos. Es decir, la dispersión modal es función directa de la diferencia de caminos que recorre la luz por la fibra según el modo al que se acople. Este efecto puede solucionarse empleando fibras monomodo (en las que sólo existe un modo o rayo de propagación fundamental), o bien fibras multimodo de índice gradual, donde el valor de la dispersión modal disminuye significativamente (aunque no llega a ser nulo) [30].

A continuación se observa una imagen donde se refleja visualmente la diferencia de caminos recorridos por los rayos propagados a través del núcleo de la fibra, y que origina en recepción un ensanchamiento del pulso transmitido [35].

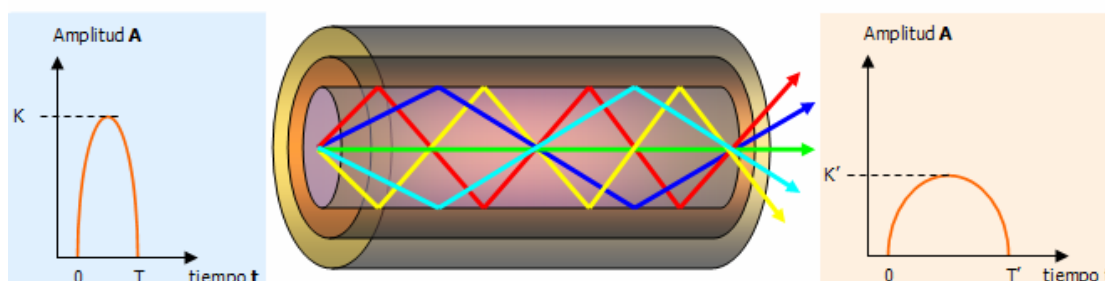


Figura 174: Dispersión modal

AP.2.2.2.2 Dispersión por polarización del modo o PMD (*polarization mode delay*)

Cuando una fibra es perfectamente circular la constante de propagación entre las polarizaciones es la misma y por lo tanto también lo es la velocidad de propagación de cada polarización.

Sin embargo, no siempre es posible una circularidad perfecta del núcleo de la fibra, lo que da lugar a que existan efectos de dispersión no deseados en la fibra. Así pues, cuando el núcleo no es perfectamente circular en una fibra monomodo la velocidad de propagación de cada polarización va a ser distinta, produciéndose la dispersión por polarización del modo o PMD [30].

En la figura 175 se muestra una imagen en la que el núcleo de la fibra no es un círculo perfecto, y la velocidad de propagación de cada polarización es diferente, originándose dispersión por polarización de modo. En este caso, se representa con dos modos degenerados polarizados linealmente [35].

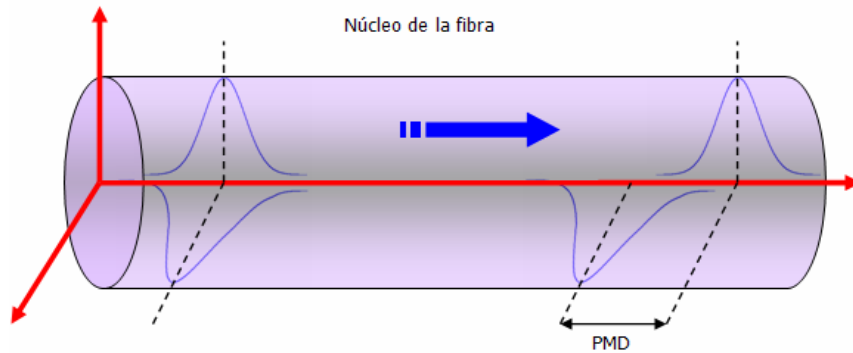


Figura 175: Dispersión por polarización del modo

En general estas pérdidas varían con la longitud de la fibra y su valor medio se denomina diferencia de dispersión de grupo o DGD (*differential group delay*), y se puede caracterizar matemáticamente a través de la siguiente expresión [36]:

$$DGD = D_{PMD} \cdot L^{1/2} \quad (79)$$

Donde D_{PMD} es la dispersión por polarización de modo y L es la longitud de la fibra. En las fibras monomodo comerciales este valor suele ser del orden de $0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$.

Por otra parte se considera que su impacto no es significativo siempre y cuando se verifique que su valor cumple la siguiente condición matemática [36]:

$$DGD < 0,1 \cdot T_b \quad (80)$$

Donde T_b es la duración del período de bit.

AP.2.2.2.3 Dispersión cromática

El fenómeno de la dispersión cromática surge como consecuencia de dos motivos: la dispersión del material y la dispersión de guía de onda, que se detallan a continuación.

▪ Dispersión del material

La dispersión del material es una característica inherente del material que no puede ser fácilmente modificada sin alterar la composición del vidrio y sin aumentar la atenuación. Esta dispersión es consecuencia de la variación del índice de refracción con

la longitud de onda de la luz en la fibra (y por tanto depende de la frecuencia). Debido a que la fuente de luz está compuesta de un espectro con más de una longitud de onda, los haces de luz de diferente longitud de onda viajan a diferentes velocidades, dando como resultado un ensanchamiento del pulso [30] [35].

▪ *Dispersión de guía de onda*

La dispersión producida por la guía de onda se debe a la anchura espectral de la fuente de luz, cuando el índice de refracción permanece constante. La razón de esto es que la geometría de la fibra causa que la constante de propagación de cada modo cambie con la longitud de onda de la luz.

La potencia de un modo o rayo se propaga parcialmente por el núcleo y parcialmente por el revestimiento. De esta forma, el índice efectivo de un modo se sitúa entre el índice de refracción del núcleo y del revestimiento, acercándose más a uno u otro dependiendo de cuál sea el porcentaje de potencia que se propaga por ellos. Si la mayor parte de la potencia está contenida en el núcleo, el índice efectivo se situará más cerca del índice de refracción del núcleo, y viceversa. Puesto que la distribución de la potencia de un modo entre el núcleo y el revestimiento depende de la longitud de onda, si ésta varía, la distribución de potencia también cambia, provocando una modificación en el índice efectivo o constante de propagación del modo [30].

Por lo tanto, aun en ausencia de dispersión del material, es decir, aunque los índices de refracción del núcleo y del revestimiento sean independientes de la longitud de onda, si la longitud de onda varía seguiría produciéndose el fenómeno de la dispersión cromática debido a la dispersión por guía de onda.

Ambas dispersiones dependen del rango de longitud de onda de la señal o lo que es lo mismo, de la frecuencia. Sin embargo la dispersión puede tener diferentes signos, dependiendo si la velocidad de la luz en la fibra se incrementa o disminuye con la longitud de onda. De esta manera las dispersiones de guía de onda y material se cancelan una a otra en un punto cercano a 1.31 μm en una fibra estándar tal como se muestra en la siguiente figura [30] [35].

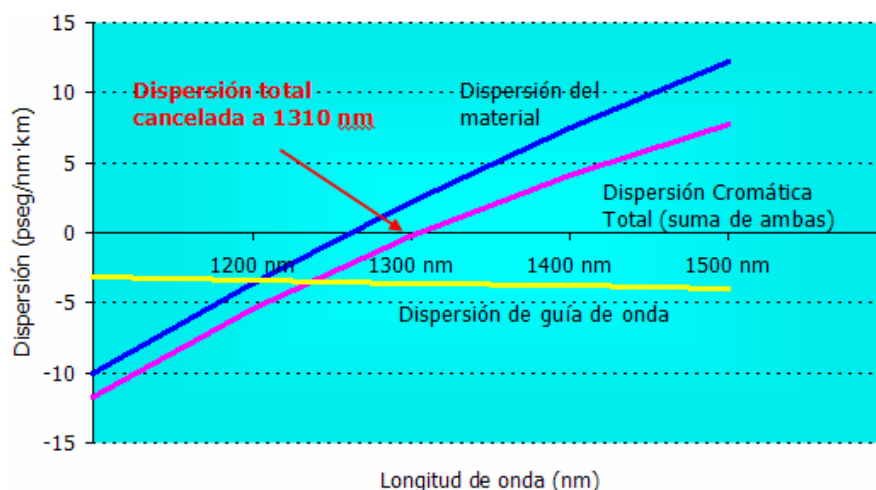


Figura 176: *Dispersión cromática*

Analizando la dispersión de forma matemática, éste se produce debido a que la constante de propagación b es proporcional a la frecuencia angular ω , es decir que $db/d\omega$ no es independiente de ω . A la expresión anterior se le denota por β_1 y su inversa se le denomina velocidad de grupo [36]:

$$\beta_1 = \frac{db}{d\omega} \rightarrow \frac{1}{\beta_1} = \text{velocidad de grupo} \quad (81)$$

La velocidad de grupo es la velocidad a la que un pulso se propaga a lo largo de la fibra en ausencia de dispersión. Sin embargo la derivada de segundo orden de la constante de propagación en función de la frecuencia angular no es cero, luego se produce dispersión. A este parámetro se le denomina dispersión de la velocidad de grupo o GVD (*group velocity delay*) y es el que gobierna la dispersión –también conocida como dispersión de velocidad de grupo– [36].

$$GVD = \frac{d^2b}{d\omega^2} \neq 0 \quad (82)$$

Los principales métodos para compensar los efectos de la dispersión cromática son tres [35] [36]:

1.- Emplear fibras compensadoras de dispersión. Tal y como ya se explicó en el apartado 3.3.3. *Clasificación y tipos de fibra óptica*, existen fibras especiales cuyo diseño reduce o anula la dispersión en la tercera ventana de transmisión. Es el caso de las fibras DSF y NZDSF. Existe además otro tipo de fibra que posee un valor de la dispersión elevado y de signo contrario al de las fibras monomodo estándar, SMF, de esta forma alternando tramos de fibras SMF y de fibras compensadoras de dispersión se obtiene en cómputo global una dispersión nula. El problema de estas fibras es su mayor atenuación y un agravamiento en los efectos de los fenómenos no lineales.

2.- Utilización de dispersión de Bragg de fibra o FBG (*fiber Bragg grating*) chirpeado. El FBG chirpeado introduce un retardo que depende de la longitud de onda de forma que se compense el retardo sufrido por las diferentes longitudes de onda de la señal transmitida. Se utilizan junto con un circulador como se muestra en la siguiente figura [36]:

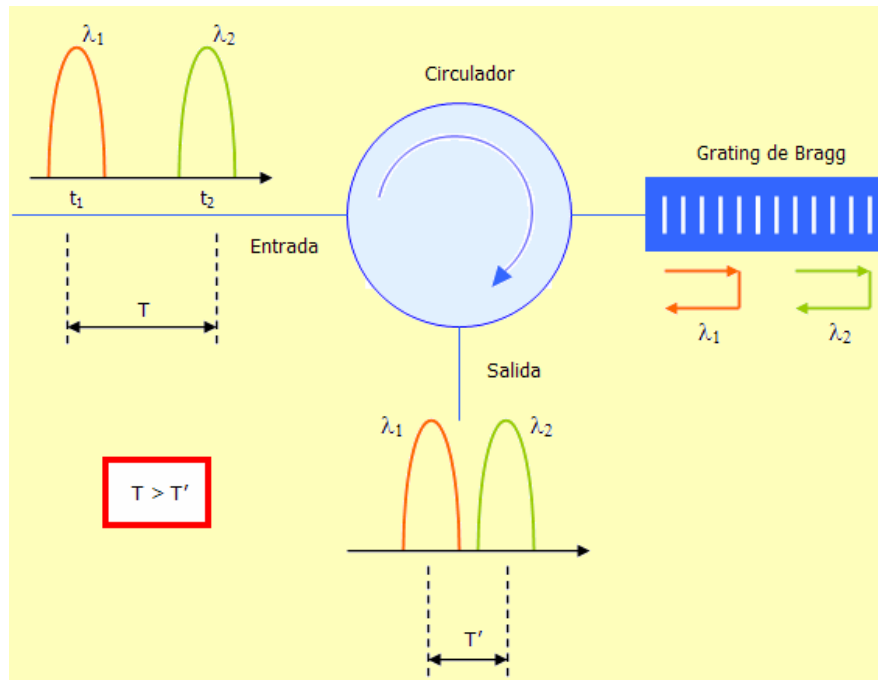


Figura 177: Grating de bragg de la fibra

3.- Prechíp en el transmisor. El prechíp en el transmisor consiste en comprimir inicialmente el pulso justo antes de ser transmitido, de tal forma que aunque sea ensanchado a lo largo de la transmisión, su efecto no será prácticamente notorio. La señal o pulso resultante de la transmisión será más ancha que la señal comprimida transmitida, pero de duración temporal muy similar a la inicial previa a la compresión. La amplitud de la señal se regenera amplificando en recepción. En la figura 178 se muestra una imagen conceptual del prechíp en el transmisor.

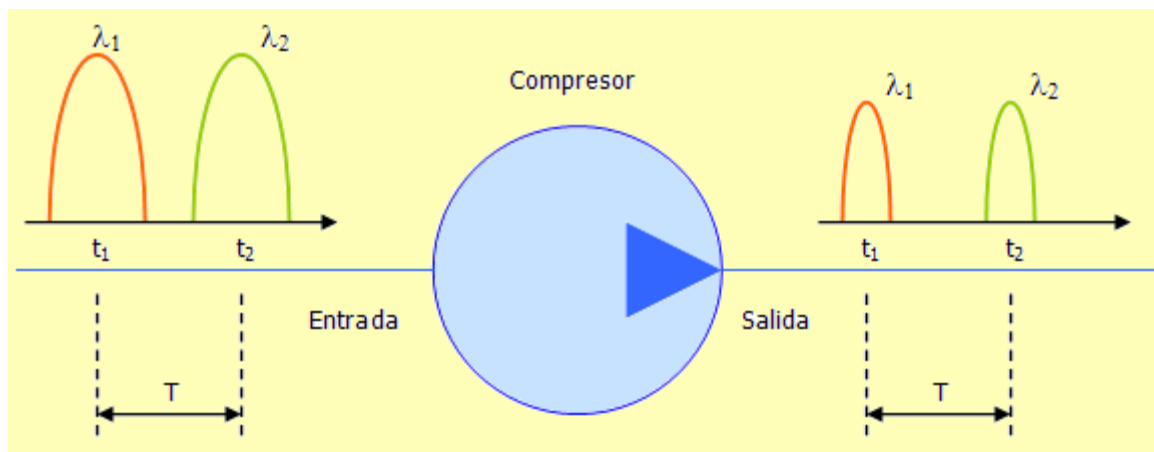


Figura 178: Prechíp en el transmisor

AP.2.2.3 Otros parámetros: no linealidades de la fibra óptica

El hecho de asumir que los sistemas de comunicaciones ópticas se comportan linealmente es una aproximación adecuada cuando se opera a unos niveles de potencia

moderados (magnitudes del orden de mW) y a velocidades de transmisión que no superen los 2.5 Gbps. Sin embargo a velocidades mayores (en torno a 10 Gbps) o potencias superiores comienzan a ser importantes ciertos efectos producidos por las no linealidades, y en el caso de sistemas WDM estos efectos son muy importantes incluso con potencias y velocidades de transmisión moderadas, condicionando el número de canales del sistema y la separación entre ellas.

Las no linealidades de la fibra se pueden clasificar en dos categorías [36]:

- Las que se producen como consecuencia de la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado, conocido como efecto Kerr, que a su vez es proporcional al cuadrado de la amplitud: modulación de autofase (SPM), modulación de fase cruzada (CPM) y la mezcla de cuarta onda (FWM).
- Las que se producen por efectos de dispersión en la fibra, debido a la interacción de las ondas de luz con los fotones (vibraciones moleculares) en el silicio del núcleo: dispersión (*scattering*) de Raman (SRS) y la dispersión (*scattering*) de Brillouin (SBS).

La respuesta de cualquier dieléctrico a campos electromagnéticos intensos es una respuesta no lineal. Por lo tanto, al aplicar un campo eléctrico E a una fibra óptica, aparece un campo de polarización inducida P que resulta ser no lineal con el campo E . en condiciones de homogeneidad, isotropía, pero no linealidad, este campo P se puede expresar [36]:

$$P(r,t) = P_L(r,t) + P_{NL}(r,t) \quad (83)$$

Donde $P_L(r,t)$ corresponde a la polarización en condiciones de linealidad y $P_{NL}(r,t)$ se denomina la polarización no lineal, que como su nombre indica surge debido a las condiciones de no linealidad.

Además se cumple que [36]:

$$P_{NL}(r,t) = \epsilon_0 \cdot c^3 \cdot E^2(r,t) \quad (84)$$

donde c^3 recibe el nombre de susceptibilidad no lineal de tercer orden. La susceptibilidad no lineal de segundo orden c^2 no se tiene en cuenta por carecer de importancia en materiales con simetría molecular como es el caso del SiO₂.

Puesto que el índice de refracción está relacionado con la susceptibilidad por la ecuación [36]:

$$n(E) = n + \frac{3}{8n} \chi^3 \cdot E^2 \quad (85)$$

La polarización no lineal es la causante de que el índice de refracción llegue a depender de la intensidad del campo dando lugar a efectos no lineales como el SPM, CPM o FWM.

Por otra parte, en los efectos de dispersión, un fotón de la onda incidente desaparece para dar lugar a un fotón de frecuencias inferior y un fonón con la energía y el momento adecuado. De esta forma, a medida que la onda incidente se propaga por la fibra, pierde potencia que va a parar a otra onda denominada onda Stokes. En general, los fenómenos de dispersión se caracterizan por un coeficiente de ganancia g , y una potencia umbral a partir de la cual los efectos comienzan a ser notables [30] [36].

AP.2.2.3.1 Modulación de autofase o SPM (*Simple phase modulation*)

El efecto de modulación de autofase o SPM surge debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente de la intensidad del pulso transmisor, lo que le convierte en un índice de refracción no lineal que induce un desplazamiento de fase proporcional a la intensidad del pulso. De esta forma, las diferentes partes del pulso sufren diferentes desplazamientos de fase que provocan que el pulso original adquiera cierta compresión, que a su vez modificará los efectos de la dispersión sobre el pulso [30].

Para poder comprender los efectos de la SPM, se puede considerar un sistema de un único canal donde el campo eléctrico es de la forma [36]:

$$E(z, t) = E \cdot \cos(\omega_0 t - \beta_0 z) \quad (86)$$

De esta forma el campo eléctrico $E(z, t)$ es una senoide cuya fase varía con $E^2 z$ y donde β_0 representa la constante de propagación a lo largo de la fibra.

En presencia de no linealidades de la fibra, la constante de propagación toma la siguiente expresión [36]:

$$\beta_0 = \frac{\omega_0}{c} \left(n + \frac{3}{8n} \chi^3 E^2 \right) \quad (87)$$

Puesto que la relación entre la constante de propagación β_0 y el índice de refracción n en el régimen lineal es [36]:

$$\beta = \frac{\omega \cdot n}{c} \quad (88)$$

La ecuación (87) se puede interpretar como una dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo E .

Debido a la SPM, la fase del campo eléctrico contiene un término cuadrático (E^2) que es proporcional a la intensidad del campo. Por lo tanto, cada parte del pulso

transmisor sufrirá un desplazamiento de fase diferente dependiendo de la amplitud de cada una de estas partes.

El signo del desplazamiento de fase debido a la SPM es negativo, por lo tanto el pico del pulso sufre el máximo desplazamiento de fase en valor absoluto, y los bordes sufren unos desplazamientos de fase cada vez menores. Dado que la frecuencia es la derivada de la fase, el borde trasero del pulso sufre un desplazamiento de frecuencia negativo y el delantero uno positivo. Además existe un valor $k > 0$ proporcional a la derivada de la frecuencia, que multiplica a la constante de propagación, por lo que se le denomina factor de compresión k . De esta forma, se llega a la conclusión de que la SPM induce una compresión positiva en los pulsos [36].

El efecto de la SPM depende del signo del parámetro β . Así pues, si $\beta > 0$ los pulsos experimentan una dispersión normal, puesto que en régimen de dispersión normal se da que $\beta > 0$ y $k > 0$, el producto $k \cdot \beta > 0$, por lo que la SPM aumenta el efecto de ensanchamiento provocado por la dispersión. Sin embargo, si $\beta < 0$ los pulsos experimentan una dispersión anormal, ya que el producto $k \cdot \beta < 0$, por lo que se produce un efecto no lineal que reduce el ensanchamiento que se sufre debido a la dispersión [36].

AP.2.2.3.2 Modulación de fase cruzada o CPM (*Crossed phase modulation*)

La modulación de fase cruzada o CPM surge debido a que el índice de refracción efectivo para una onda depende no sólo de la intensidad de la misma sino también de la intensidad de cualquier onda que se propague junto a ella. Por este motivo, en sistemas WDM el desplazamiento de fase dependiente de la intensidad del campo y la consecuente compresión inducida por el efecto de la SPM se agrava a causa de las intensidades de las señales de los otros canales [30].

Para poder comprender los efectos de la CPM basta con considerar un sistema WDM con dos canales de transmisión [36]:

$$E(z, t) = E_1 \cdot \cos(\omega_1 t - \beta_1 z) + E_2 \cdot \cos(\omega_2 t - \beta_2 z) \quad (90)$$

El campo eléctrico resultante tiene una componente sinusoidal en ω_1 , que a medida que se propaga a través de la fibra adquiere una fase no lineal dependiente de la intensidad dada por la siguiente expresión matemática [36]:

$$\varphi_{NL} = \frac{\omega_1 \cdot n}{c} \left(|E_1|^2 + 2|E_2|^2 \right) \cdot z \quad (91)$$

El primer término se debe a la SPM, mientras que el efecto del segundo término es lo que se denomina modulación de fase cruzada o CPM. Se puede observar que, en el caso que $E_1 = E_2$ para que los dos campos tengan la misma intensidad, el efecto de la CPM sería dos veces peor que el de la SPM. Además, como efecto de la CPM es cualitativamente similar al de la SPM, es lógico esperar que la CPM aumente la

compresión agravando los consecuentes efectos del ensanchamiento del pulso en sistemas WDM.

En la práctica, el efecto de la CPM en sistemas WDM que operan sobre fibras monomodo se puede reducir de forma significativa aumentando el espaciado entre los canales de transmisión. Así, debido a la dispersión, las constantes de propagación llegan a ser lo suficientemente diferentes como para que los pulsos de cada canal viajen de forma independiente. Otra forma de reducir el efecto de la CPM es la de disponer canales situados en frecuencias suficientemente espaciadas, ya que al propagarse se separan aún más [36].

AP.2.2.3.3 Modulación de cuarta onda o FWM (*Fourth wave modulation*)

La modulación de cuarta onda o FWM es un fenómeno por el cual cuando se propagan varias ondas a frecuencias $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N$, la dependencia con la intensidad del índice de refracción no sólo induce a desplazamientos de fase dentro de cada canal, sino también a la aparición de nuevas ondas a frecuencias $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$. Entre estas señales, las más problemáticas son las que corresponden a [30] [36]:

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \quad \forall i, j \neq k \quad (92)$$

Para medios en los que la dispersión no es nula, el resto de ellas puede despreciarse debido a la carencia de concordancia de fase. Para comprender los efectos de la FWM se puede considerar un sistema WDM con tres canales donde el campo eléctrico es de la forma [36]:

$$E(z, t) = \sum_{i=1}^{i=3} E_i \cdot \cos(\omega_i t - \beta_i z) \quad (93)$$

Aún en presencia de dispersión, pueden llegar a satisfacer la condición de concordancia de fase por tener una constante de propagación casi constante para esas frecuencias, sin embargo el resto de componentes no la satisfarán, y por lo tanto podrán despreciarse.

AP.2.2.3.4 Dispersión estimulada de Raman o SRS (*Stimulate Raman scattering*)

La dispersión estimulada de Raman o SRS es un efecto de banda ancha mediante el cual si se introducen en una fibra o dos más señales a diferentes longitudes de onda se produce una transferencia de potencia de la señal de mayor frecuencia a la de menor frecuencia. Además el acoplo de potencia se puede producir tanto en el sentido de la propagación de las señales como en el sentido inverso, siempre y cuando en ese momento existe presencia de potencia en los dos canales [30].

La interacción entre la onda incidente y la onda Stokes (onda a la que se le transfiere la potencia) está gobernada por la siguiente pareja de ecuaciones [36]:

$$\frac{dI_S}{dz} = g_R \cdot I_P \cdot I_S - \alpha_S \cdot I_S \quad (94)$$

$$\frac{dI_P}{dz} = -\frac{\omega_P}{\omega_S} \cdot g_R \cdot I_P \cdot I_S - \alpha_P \cdot I_P$$

donde I_P es la intensidad de la onda incidente, I_S es la intensidad de la onda Stokes, los términos α_P y α_S son los coeficientes de absorción de la onda incidente y Stokes respectivamente y g_R es el coeficiente de ganancia de Raman, que depende de la composición del núcleo de la fibra. En la figura 179 se puede observar el coeficiente g_R para una fibra de silicio en función del desplazamiento de frecuencia a una longitud de onda $I_P = 1,55$ mm.

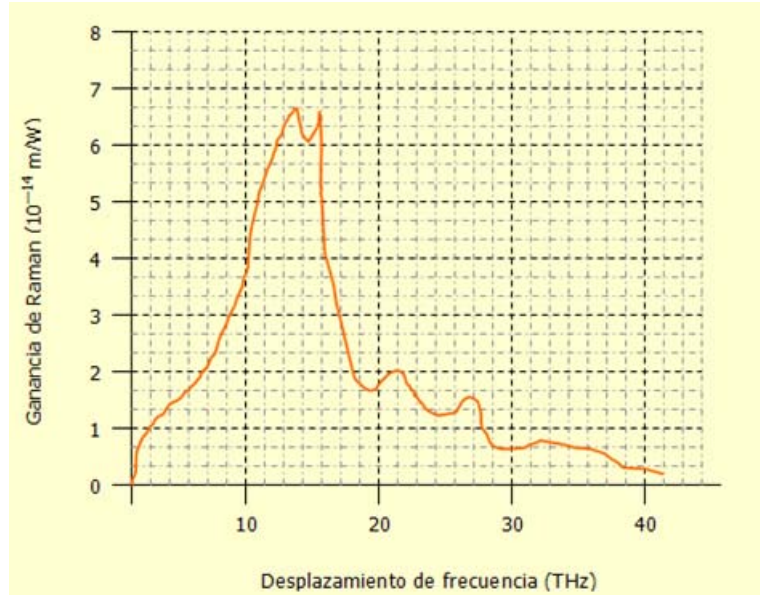


Figura 179: Coeficiente de Raman en una fibra de silicio

Lo más destacable de la ganancia de Raman es que se extiende a lo largo de un gran rango de frecuencias (hasta 40 THz), y para una longitud de onda de $I_P = 1,55$ mm alcanza un valor máximo de aproximadamente $6,67 \cdot 10^{-14}$ m/W para un desplazamiento de frecuencia del orden de 13,2 THz.

Por otra parte en el SRS existe una potencia umbral que se define como la potencia de la onda incidente y para la cual las dos ondas, incidente y Stokes, tienen a la salida de la fibra la misma potencia. Existe una aproximación matemática de dicha potencia umbral a través de la expresión [36]:

$$P_{umbral} \approx 16 \cdot b \cdot \frac{A_e}{L_e \cdot g_R} \quad (95)$$

donde L_e es la longitud de onda efectiva, y b puede tomar un valor entre 1 y 2 dependiendo de las polarizaciones relativas de la onda incidente y Stokes. El peor de los casos será para $b = 1$ ya que la potencia umbral será la menor posible.

Del mismo modo, también existe una potencia umbral para la onda Stokes que se puede generar en el sentido opuesto al de la propagación de la onda incidente, y la expresión es similar, sin más que sustituir el valor de 16 por 20. Como el umbral para el SRS hacia delante se alcanza antes que el umbral para la SRS hacia atrás, esa es la razón por la cual éste último no se suele tener tanto en cuenta en el estudio de sistemas de comunicaciones ópticas.

Por último, cabe destacar que para reducir los efectos de la SRS conviene reducir al máximo el espaciado entre canales y a ser posible no superar la potencia umbral.

AP.2.2.3.5 Dispersión estimulada de Brillouin o SBS (*Stimulate Brillouin scattering*)

El origen de la dispersión estimulada de Brillouin o SBS es similar al del SRS, donde un fotón de la onda incidente desaparece para dar lugar a un fotón de frecuencia inferior y un fonón con la energía y el momento adecuado. Sin embargo existen algunas diferencias. Así pues, en el SBS la onda Stokes se propaga en sentido opuesto al de la onda incidente, mientras que en el SRS podía propagarse en los dos sentidos, y el umbral de potencia depende de la anchura espectral de la onda incidente. Estas diferencias se deben a que en el SBS se ven involucrados fonones acústicos en lugar de ópticos como era el caso del SRS [30] [36].

Además en el SBS la ganancia es conocida como ganancia de Brillouin, su espectro tiene una anchura de aproximadamente 20 MHz, y también depende de la composición del núcleo de la fibra. Por otra parte, el coeficiente de ganancia g_B es casi independiente de la longitud de onda incidente, y su valor máximo para fibras de silicio es de aproximadamente $4 \cdot 10^{-11}$ m/W, alcanzándolo para un desplazamiento de frecuencia del orden de 11,1 GHz [30].

Sin embargo, cuando la anchura espectral de la onda incidente es superior a la anchura del espectro de la ganancia, ésta se ve reducida según la siguiente expresión matemática [36]:

$$g_B^{efectiva} = \frac{\Delta f_B}{\Delta f_B + \Delta f_{in}} \cdot g_B \quad (96)$$

En esta expresión, Δf_B equivale a la anchura espectral de la ganancia y Δf_{in} equivale a la anchura espectral de la onda incidente. Por lo tanto, para el caso de pulsos con una anchura T_0 lo suficientemente pequeña, el valor del coeficiente g_B puede caer por debajo del coeficiente g_R .

La interacción entre la onda incidente y la onda Stokes está gobernada por una pareja de ecuaciones similar a las del SRS [36]:

$$\frac{dI_S}{dz} = -g_B \cdot I_P \cdot I_S + \alpha \cdot I_S \quad (97)$$

$$\frac{dI_P}{dz} = -g_B \cdot I_P \cdot I_S - \alpha \cdot I_P$$

Pero en este caso cambia el signo de la derivada primera, para tener en cuenta el sentido opuesto de la propagación de la onda Stokes. Además como la onda incidente y la onda Stokes tienen frecuencias muy próximas, el coeficiente de frecuencias se puede considerar unitaria y el coeficiente de absorción único e igual a α .

Con respecto a la potencia umbral en el SBS, una buena aproximación es la expuesta en la siguiente expresión [36]:

$$P_{umbral} \approx 21 \cdot b \cdot \frac{A_e}{L_e \cdot g_B} \quad (98)$$

Asumiendo $b = 1$, un valor típico de la potencia umbral para fibras de silicio es de 1,3 mW. Pero si se da el caso que $\Delta f_{in} > \Delta f_B$, la potencia umbral aumenta y la aproximación pasa a ser la siguiente [36]:

$$P_{umbral} \approx 21 \cdot b \cdot \frac{A_e}{L_e \cdot g_B} \cdot \left(1 + \frac{\Delta f_{in}}{\Delta f_B} \right) \quad (99)$$

Por último cabe destacar que para reducir los efectos de la SBS se puede optar por aumentar la anchura espectral de la onda incidente para así disminuir la ganancia de Brillouin o también procurar no superar la potencia umbral.

Apéndice 3

Dispositivos emisores y receptores de luz

A lo largo de los siguientes apartados se detallarán los aspectos más relevantes de los dispositivos transmisores y receptores de luz intervinientes en las redes de fibra óptica.

AP.3.1 Transmisores ópticos

Los transmisores ópticos son capaces de convertir una señal eléctrica de entrada (información) en una señal óptica correspondiente, conduciéndola hacia el canal de comunicación, en este caso, la fibra óptica.

Tal y como ya se ha comentado en el apartado 3.4 del capítulo 3 del documento, existen dos tipos de emisores de luz: los emisores de luz coherente y los emisores de luz no coherentes, cuyas características principales se detallan a continuación.

AP.3.1.1 Emisores de luz no coherente: Diodos LED

Los emisores de luz no coherente corresponden a los diodos de luz LED, también conocido como LED (acrónimo del inglés de *Light-Emitting Diode*). Es un dispositivo semiconductor (diodo) que emite luz no coherente de espectro reducido cuando se polariza de forma directa la unión PN del mismo y circula por él una corriente eléctrica.

AP.3.1.1.1 Tecnología LED

En corriente continua (CC), todos los diodos emiten una cierta cantidad de radiación cuando los pares electrón-hueco se recombinan, es decir, cuando los electrones caen desde la banda de conducción (de mayor energía) a la banda de valencia (de menor energía). Indudablemente, la frecuencia de la radiación emitida y, por ende, su color, dependerá de la altura de la banda prohibida (diferencias de energía entre las bandas de conducción y valencia), es decir, de los materiales empleados. Los diodos convencionales, de silicio o germanio, emiten radiación infrarroja muy alejada del espectro visible. Sin embargo, con materiales especiales pueden conseguirse longitudes de onda visibles. Los LED, además tienen geometrías especiales para evitar que la

radiación emitida sea reabsorbida por el material circundante del propio diodo, lo que sucede en los convencionales [10].

A continuación se muestra en la figura 180 una tabla con los compuestos más empleados habitualmente en la fabricación de LEDs [27].

Compuesto	Color	Longitud de onda
Arseniuro de galio (GaAs)	Infrarrojo	940nm
Arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs)	Rojo e infrarrojo	890nm
Arseniuro fosfuro de galio (GaAsP)	Rojo, naranja y amarillo	630nm
Fosfuro de galio (GaP)	Verde	555nm
Nitruro de galio (GaN)	Verde	525nm
Seleniuro de zinc (ZnSe)	Azul	
Nitruro de galio e indio (InGaN)	Azul	450nm
Carburo de silicio (SiC)	Azul	480nm
Diamante (C)	Ultravioleta	
Silicio (Si)	En desarrollo	

Figura 180: *Coeficiente de Raman en una fibra de silicio*

Un diodo posee una serie de elementos que constituyen su propia estructura física y son los que se muestra en la figura 181 [67].

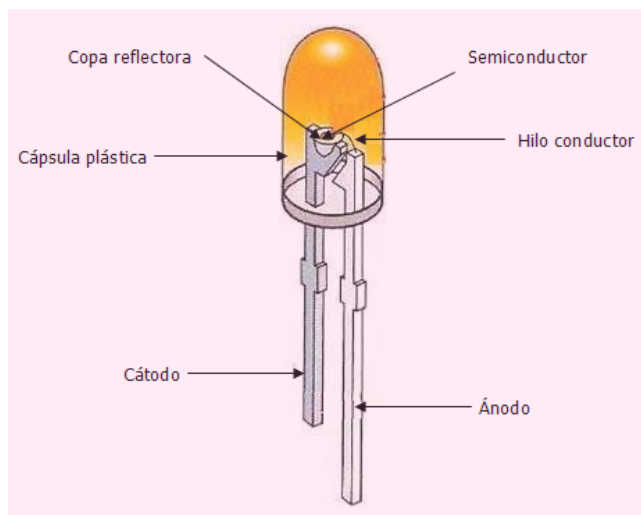


Figura 181: *Estructura básica de un diodo LED*

Los primeros diodos construidos fueron los diodos infrarrojos y de color rojo, permitiendo el desarrollo tecnológico posterior la construcción de diodos para longitudes de onda cada vez menores. En particular, los diodos azules fueron desarrollados a finales de los 90 por Shuji Nakamura, añadiéndose a los rojos y verdes desarrollados con anterioridad, lo que permitió, por combinación de los mismos, la obtención de luz blanca. El diodo de seleniuro de zinc puede emitir también luz blanca

si se mezcla la luz azul que emite con la roja y verde creada por fotoluminiscencia. La más reciente innovación en el ámbito de la tecnología LED son los diodos ultravioletas, que se han empleado con éxito en la producción de luz blanca al emplearse para iluminar materiales fluorescentes [27].

Tanto los diodos azules como los ultravioletas son caros respecto de los más comunes (rojo, verde, amarillo e infrarrojo), siendo por ello menos empleados en las aplicaciones comerciales.

Los LEDs comerciales típicos están diseñados para potencias del orden de los 30 a 60 mW. En torno a 1999 se introdujeron en el mercado diodos capaces de trabajar con potencias de 1 W para uso continuo; estos diodos tienen matrices semiconductoras de dimensiones mucho mayores para poder soportar tales potencias e incorporan aletas metálicas para disipar el calor generado por efecto Joule [27].

Hoy en día, se están desarrollando y empezando a comercializar LEDs con prestaciones muy superiores a las de unos años atrás y con un futuro prometedor en diversos campos, incluso en aplicaciones generales de iluminación. Como ejemplo, se puede destacar que Nichia Corporation ha desarrollado LEDs de luz blanca con una eficiencia luminosa de 150 lm/W, utilizando para ello una corriente de polarización directa de 20 mA. Esta eficiencia, comparada con otras fuentes de luz en términos de eficiencia sólo, es aproximadamente 1,7 veces superior a la de la lámpara fluorescente con prestaciones de color altas (90 lm/W) y aproximadamente 11,5 veces la de una lámpara incandescente (13 lm/W). Su eficiencia es incluso más alta que la de la lámpara de vapor de sodio de alta presión (132 lm/W), que está considerada como una de las fuentes de luz más eficientes [10] [39].

El comienzo del siglo XXI ha visto aparecer los diodos OLED (LED orgánicos), fabricados con materiales polímeros orgánicos semiconductores. Aunque la eficiencia lograda con estos dispositivos está lejos de la de los diodos inorgánicos, su fabricación promete ser considerablemente más barata que la de aquellos, siendo además posible depositar gran cantidad de diodos sobre cualquier superficie empleando técnicas de pintado para crear pantallas a color [27] [36].

En la siguiente figura se puede observar una imagen real de algunos diodos LED disponibles en el mercado [67].



Figura 182: *Varios diodos LED*

AP.3.1.1.2 Clasificación de diodos LED

En general se pueden clasificar los diodos LED específicos para su utilización en fibra óptica en dos tipos [36] [38]:

- **LED tipo Burrus:** poseen una estructura especialmente diseñada para su utilización en fibras ópticas. Se ha provocado una oquedad en el sustrato para alojar un extremo de la fibra óptica y aumentar así el acople óptico entre la unión y la fibra, de modo que puede entrar mayor potencia a la fibra.
- **Diodo emisor de extremo:** los contactos eléctricos cubren la parte inferior y superior del borde del emisor. El LED confina la luz en una región estrecha entre la unión pn, creando una guía de onda que canaliza la luz hasta el extremo donde se acopla la fibra.

Los más utilizados comúnmente en gran parte de las instalaciones ópticas realizadas en nuestro país que utilizan diodos LED, son el tipo Burrus, dado que su coste económico es asequible y garantiza unos resultados medianamente competitivos.

AP.3.1.2 Emisores de luz coherente: láser

Los emisores de luz no coherente corresponden a los láseres. El término láser es el acrónimo del inglés amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Un láser toma la forma de un diodo de inyección pn polarizado en directo, en el cual se ha incorporado además de la unión pn, un par de superficies reflectantes que encierran a la unión que permiten el confinamiento óptico de la radiación que se genera por recombinación entre las vecindades de la unión [10].

AP.3.1.2.1 Mecanismos de generación de un láser

Existen cuatro procesos básicos (sistemas de bombeo) que se producen en la generación del láser dentro del medio activo, y son los denominados bombeo, emisión espontánea de radiación, emisión estimulada de radiación y absorción, que se detallan a continuación [10] [39].

- **Bombeo:** se provoca mediante una fuente de radiación como puede ser una lámpara, el paso de una corriente eléctrica, o el uso de cualquier otro tipo de fuente energética que provoque una emisión.
- **Emisión espontánea de radiación.** Los electrones que vuelven al estado fundamental emiten fotones. Es un proceso aleatorio y la radiación resultante está formada por fotones que se desplazan en distintas direcciones y con fases distintas generándose una radiación monocromática incoherente.

- **Emisión estimulada de radiación.** Es la base de la generación de radiación de un láser, se produce cuando un átomo en estado excitado recibe un estímulo externo que lo lleva a emitir fotones y así retornar a un estado menos excitado. El estímulo en cuestión proviene de la llegada de un fotón con energía similar a la diferencia de energía entre los dos estados. Los fotones así emitidos por el átomo estimulado poseen fase, energía y dirección similares a las del fotón externo que les dio origen. La emisión estimulada descrita es la raíz de muchas de las características de la luz láser. No sólo produce luz coherente y monocroma, sino que también "amplifica" la emisión de luz, ya que por cada fotón que incide sobre un átomo excitado se genera otro fotón.
- **Absorción.** Proceso mediante el cual se absorbe un fotón. El sistema atómico se excita a un estado de energía más alto, pasando un electrón al estado metaestable. Este fenómeno compete con el de la emisión estimulada de radiación.

AP.3.1.2.2 Caracterización de un láser

El funcionamiento de un láser depende de los elementos básicos y componentes que lo constituyen. Un láser genérico consta de los siguientes elementos funcionales:

Para poder caracterizar un láser, se recurre al estudio del haz de luz que emite, extrapolando su resultado al funcionamiento general del aparato. Existen una serie de parámetros comunes que se utilizan habitualmente para caracterizar un haz de láser, y son los que se muestran a continuación [10]:

- Longitud de onda de emisión.
- Duración de la emisión, que además puede ser continua o pulsada.
- Potencia o energía de salida.
- Diámetro del haz de luz.
- Divergencia.

AP.3.1.2.3 Clasificación de los láseres

Existe una clasificación genérica de los tipos de láseres atendiendo a la naturaleza de su medio activo. Según esta clasificación, los láseres se clasifican en [10] [36]:

- **Láser de medio activo gaseoso.** Estos láseres poseen su medio activo de elementos gaseoso tales como HeNe, CO₂, N₂, de excímeros, etc.

- **Láseres de estado sólido.** En este tipo de láseres, su medio activo consiste en un cristal dopado artificialmente con iones de otro material que presentan un estado sólido, como por ejemplo el láser de Nd: YAG.
- **Láseres de semiconductores.** Estos láseres poseen un medio activo constituido por un diodo con una elevada concentración de impurezas que convierten a la parte activa del diodo en semiconductor.
- **Láseres de colorantes.** En este tipo de láseres el medio activo está constituido generalmente por una solución alcohólica de sustancias orgánicas (colorantes).

Atendiendo al campo que ocupa el presente proyecto, existe una clasificación paralela de los láseres en función de su estructura y funcionamiento, que determinarán su utilización para transportar información a través de fibra multimodo o monomodo. Por tanto, para comunicaciones ópticas se pueden clasificar los láseres en dos grupos [10]:

- **Diodo láser.** Este tipo de láser corresponden a uno del tipo Fabry-Perot, y son válidos para su utilización en fibras multimodo. Su longitud de onda típica de la cavidad resonante es de 250 μm y producen usualmente entre 5 y 11 modos simultáneamente. La potencia total emitida por este tipo de láser varía entre los valores de 2 mW y 10 mW, pero existen diodos láseres especiales que pueden emitir hasta 1 mW de potencia.
- **Láser longitudinal.** El láser longitudinal es válido para su utilización en fibras monomodo. Añaden una condición de oscilación a la cavidad resonante formada en la región activa, obligando al láser a reducir los modos que admite. Existen dos tipos de láseres longitudinales: los láser con realimentación distribuida o DFB (*Distributed Feedback*), donde las caras laterales del cristal se cubren con capas antirreflectantes para reducir las pérdidas; y el láser con cavidad acoplada (*Coupled Cavity*) que acopla la luz a una cavidad externa.

AP.3.2 Receptores ópticos

Los receptores ópticos transforman las señales ópticas en señales eléctricas, en concreto, es el fotodetector el encargado de esta transformación, recobrando la información enviada por el transmisor a través del canal de fibra óptica.

AP.3.2.1 Fundamentos generales de los fotodiodos

Los fotodiodos se basan en el proceso de absorción estimulada de fotones. Para poder explicar adecuadamente el funcionamiento de estos elementos, se toma de ejemplo la siguiente figura, donde existe una unión pn polarizada en inversa [36].

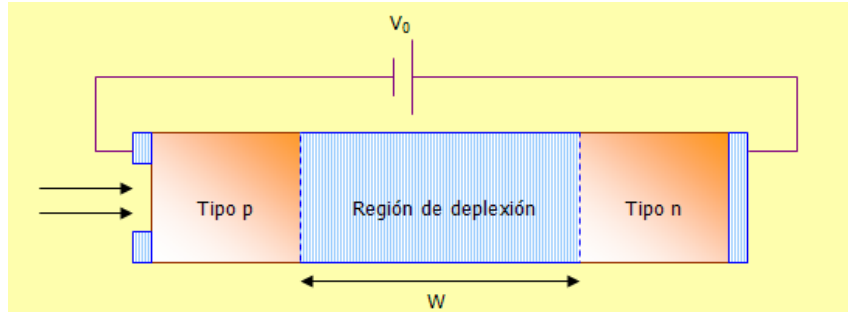


Figura 183: Esquema de unión PN polarizada en inversa

Al incidir un fotón sobre el semiconductor tal que su energía es superior a la energía del gap (E_g) y que viene dada por la expresión $E = h \cdot f$, es absorbido generándose un par electrón-hueco. Así las longitudes de onda que pueden ser detectadas vienen determinadas por la siguiente expresión matemática [36]:

$$h \cdot f \geq E_g \equiv \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \Rightarrow \lambda \leq \frac{1,24}{E_g (eV)} \quad (111)$$

Debido al campo eléctrico establecido por la tensión aplicada en el circuito, los electrones y huecos se ponen en circulación dando lugar a una corriente eléctrica. Al tener el fotodiodo polarizado en inversa el campo eléctrico interno es más intenso, por tanto la aceleración que experimentan los pares electrones-huecos es mayor y la respuesta del fotodiodo ante variaciones de la potencia óptica es mejor.

La corriente resultante I_p es proporcional a la potencia óptica incidente, según la siguiente expresión [36]:

$$I_p = R \cdot P_{in} \quad (112)$$

donde R es la responsividad del fotodiodo. Este parámetro, cuyas unidades son A/W, representa la capacidad del fotodiodo de generar pares electrón-hueco por incidencia de una señal óptica.

Otro parámetro importante en un fotodiodo es su ancho de banda. El ancho de banda de un fotodiodo determina la velocidad con que responde éste ante las variaciones de la potencia óptica incidente. Se define el tiempo de subida de un fotodetector, T_r , como el intervalo de tiempo transcurrido desde que la corriente I_p aumenta desde el 10% hasta el 90% de su valor final ante una variación abrupta de la potencia óptica incidente. Este intervalo de tiempo desde la llegada de un pulso de luz al fotodiodo y la aparición de la corriente se debe al tiempo que tardan los electrones y huecos generados por la absorción de los fotones en salir del fotodiodo al circuito [36].

Una buena aproximación del ancho de banda del fotodiodo en función del tiempo de subida es la que viene determinada por la siguiente expresión [36]:

$$B_e = \frac{0,35}{T_r} \quad (113)$$

Junto con la responsividad y el ancho de banda, un tercer parámetro importante en un fotodiodo es la corriente de oscuridad, I_d . Esta corriente se genera en ausencia de una señal óptica, tiene su origen en los pares electrón-hueco generados térmicamente, y en un buen fotodiodo esta I_d debe ser despreciable, con valores inferiores a 10 nA.

AP.3.2.2 Fotodiodo PIN

El ancho de banda de un fotodiodo está limitado por el fenómeno de la absorción fuera de la región de deplexión. Los electrones (huecos) generados en la región p (región n) son difundidos a través de la región de deplexión. Este fenómeno de difusión es un proceso lento que distorsiona la respuesta temporal del fotodiodo [10].

El efecto de la difusión se puede reducir aumentando el ancho de la región de deplexión y reduciendo las zonas p y n. Así la absorción de fotones se produce mayoritariamente en el interior de la región de deplexión. Este es el fundamento de los fotodiodos PIN [10].

En un fotodiodo PIN, como su nombre indica, se intercala un material intrínseco en la unión p-n. De esta forma se incrementa la región de deplexión, incrementado a su vez la responsividad, puesto que el número de fotones absorbidos en esta zona aumenta. Y el hecho de aumentar la responsividad, hace aumentar la eficiencia del fotodiodo. En cambio, el tiempo de repuesta aumenta ya que los electrones y huecos generados por la absorción tardan más tiempo en cruzar la región de deplexión [36].

Un fotodiodo PIN de uso común, es el fotodiodo PIN de InGaAs, que se muestra en la figura 184.

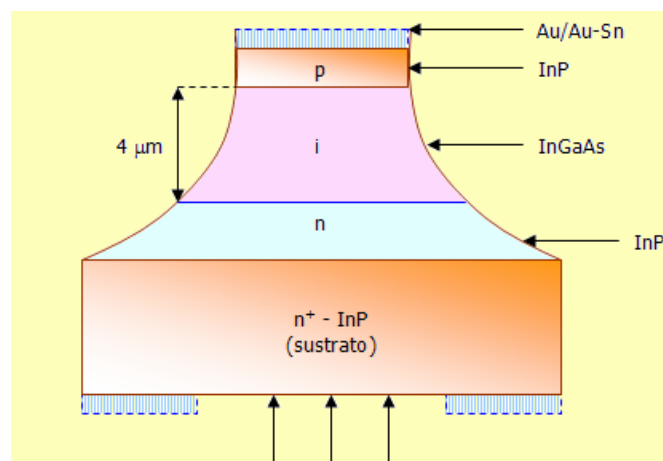


Figura 184: Estructura de unión PIN de InGaAs

Con este tipo de estructuras, en el que el material intrínseco está rodeado de capas tipo p y tipo n de distintos materiales semiconductores, se consigue que la absorción se produzca únicamente en la capa intrínseca eliminando completamente el efecto de la difusión. Para ello, se elige convenientemente la energía del gap para que el material sea transparente para las longitudes de onda de trabajo [36] [39].

Como la energía del gap de la capa InP es de 1.35 eV, para las longitudes de onda mayores que 0.92 μm este material es transparente, pues no se produce el fenómeno de la absorción de los fotones incidentes [39].

Los fotodiodos PIN se caracterizan por su fácil fabricación, su alta fiabilidad y su bajo ruido. Su ancho de banda es muy elevado y sus principales características de los tres tipos de fotodiodos PIN más comunes son los que se muestran a continuación (fotodiodos Si, Ge e InGaAs) [36].

Parámetro	Símbolo	Unidad	Si	Ge	InGaAs
Longitud de onda	λ	μm	0.4-1.1	0.8-1.8	1.0-1.7
Responsividad	R	A/W	0.4-0.6	0.5-0.7	0.6-0.9
Eficiencia	H	%	75-90	50-55	50-70
Corriente de oscuridad	I_d	nA	1-10	50-500	1-20
Tiempo de subida	T_r	ns	0.5-1	0.1-0.5	0.05-0.5
Ancho de banda	B	GHz	0.3-0.6	0.5-3	1-5

Figura 185: Características principales de los fotodiodos PIN

AP.3.2.3 Fotodiodo de avalancha o APD

Los fotodiodos de avalancha o APD (*Avalanche Photodiodes*) se emplean cuando la potencia recibida puede ser limitada, ya que tienen una responsividad mayor que los fotodiodos PIN. Esto se debe a que todos los fotodiodos requieren una corriente mínima para su correcto funcionamiento, es decir, requieren una potencia óptica mínima. Por ello son preferibles los fotodiodos con una responsividad alta, pues requieren una menor potencia óptica para su buen funcionamiento [36].

Los APD se basan en el fenómeno de la ionización por impacto. Un electrón (al igual que un hueco) generado por la absorción de un fotón con la suficiente energía cinética, puede generar nuevos pares electrón-hueco al dar parte de su energía a otro electrón de forma que éste pase de la banda de valencia a la banda de conducción. Luego la corriente generada por la absorción de los fotones incidentes I_p , se ve incrementada por un factor M (ganancia multiplicativa de corriente, esto es, el promedio de electrones generados por cada fotón) [36].

$$I_m = M \cdot I_p \quad (114)$$

Por tanto la responsividad de un fotodiodo APD es la que se muestra en la siguiente ecuación [36]:

$$R_{APD} = \frac{I_m}{P_{in}} = \frac{M \cdot I_p}{P_{in}} = M \cdot R \quad (115)$$

Los fotodiodos de avalancha, al multiplicar la fotocorriente generada en la unión p-n consiguen un aumento de la sensibilidad con respecto a los fotodiodos PIN. En la siguiente tabla se realiza una comparación de los valores de las principales características de los fotodiodos de avalancha de Si, Ge e InGaAs [36].

Parámetro	Símbolo	Unidad	Si	Ge	InGaAs
Longitud de onda	λ	μm	0.4-1.1	0.8-1.8	1.0-1.7
Responsividad	R	A/W	80-130	3-30	5-20
Ganancia APD	M	-	100-500	50-200	10-40
Corriente de oscuridad	I_d	nA	0.1-1	50-500	1-5
Tiempo de subida	T_r	ns	0.1-2	0.5-0.8	0.1-0.5
Ancho de banda	B	GHz	0.2-1.0	0.4-0.7	1-3

Figura 186: Características principales de los fotodiodos de avalancha

El diseño de los APD difiere principalmente en un aspecto de los fotodiodos PIN. Se añade una capa adicional, donde se generan los pares electrón-hueco por el fenómeno de la ionización por impacto, por ello esta capa se denomina capa de multiplicación. En la figura 187 se muestra una estructura de un APD de Si. En este diseño la capa de depleción alcanza el contacto a través de las zonas de absorción y multiplicación [39].

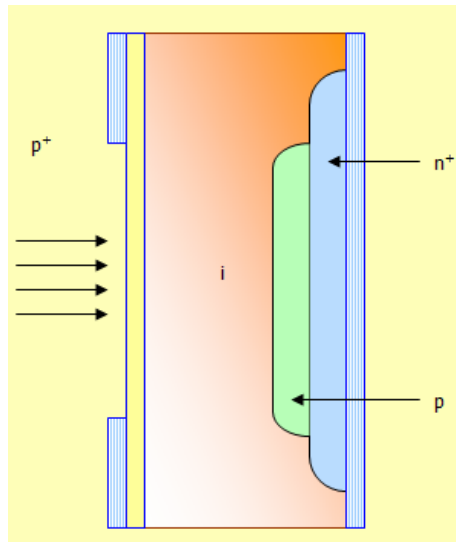


Figura 187: Fotodiodo de avalancha

En los APD de InGaAs se emplean estructuras como las que se muestran a continuación (figura 188), ya que en estructuras como las de Si o Ge, se perforaría debido al campo eléctrico al que se está sometiendo el sistema [39].

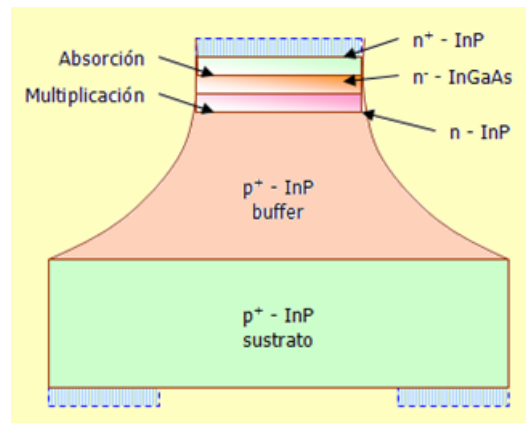


Figura 188: Fotodiodo APD de InGaAs

El empleo de una capa adicional de InP solventa este problema ya que un campo eléctrico intenso puede existir en esta capa sin perforarla. Esta estructura se denomina SAM (*separate absorption multiplication*) [39].

Apéndice 4

Elementos de transmisión en sistemas de fibra óptica

A lo largo de los siguientes apartados se detallarán los aspectos más relevantes de los diferentes elementos de transmisión utilizados en sistemas ópticos, tanto elementos pasivos como activos.

AP.4.1 Cables ópticos

El cable es la estructura que protege a las fibras ópticas de la degradación medioambiental, de daños mecánicos, facilita la manipulación de las fibras y las aísla de las tensiones mecánicas que puedan ocurrir durante el proceso de instalación.

AP.4.1.1 Componentes generales de los cables ópticos

Teniendo en cuenta lo anterior, los cables de fibra óptica se fabrican con varios materiales para adecuarse al entorno de la instalación, ya sean dedicados a interior como a exterior. Los componentes más comunes son los siguientes [28] [30]:

- **Polietileno (PE)**

El polietileno es un polímero vinílico que se utiliza como cubierta de protección por sus propiedades de resistencia frente a la intemperie y la humedad, además de ser eléctricamente estable.

- **Cloruro de polivinilo (PVC)**

El PVC es un polímero vinílico similar al PE, pero muy resistente al agua y al fuego por su alto contenido en cloro.

- **Poliuretano (PU)**

El poliuretano son polímeros mejor conocidos para hacer espumas y cubiertas para cables. Pueden ser cauchos, pinturas, fibras o adhesivos. Muchas composiciones tienen buenas propiedades de resistencia al fuego.

- **Hidrocarburos y polifluorados (fluoropolímeros)**

Este es un polímero de buenas propiedades de resistencia al fuego, poca emisión de humos y buena flexibilidad, utilizado para instalaciones interiores.

- **Vinilacetato de etileno**

Este es un polímero de buenas propiedades de resistencia al fuego, muy poca emisión de humos y buena flexibilidad, utilizado para instalaciones interiores. En general, este tipo de sustancia se utiliza en la fabricación de los denominados cables libres de halógenos (LSZH y TI).

- **Cabos de Aramida (Kevlar®)**

Las Aramidas y el Kevlar® (marca registrada de Dupont) son materiales pertenecientes a la familia del Nylon. Se utilizan para hacer objetos tales como chalecos antibalas y neumáticos para bicicletas a prueba de pinchaduras. En los cables de fibra óptica se utiliza para atar y proteger los tubos o fibras individuales o como miembro central de refuerzo.

- **Coraza de acero**

La coraza de acero o armadura se utiliza frecuentemente en instalaciones interiores y exteriores. Generalmente se utiliza en los cables enterrados para proporcionar resistencia a la compresión y a los roedores. En ambientes industriales se utiliza dentro de la planta cuando el cable se instala sin conductos o bandejas de protección. Sin embargo, esta protección extra que se le añade al cable de fibra sacrifica la ventaja como dieléctrico que posee, por lo que es conveniente llevarlos a tierra en el proceso de instalación, evitando campos electromagnéticos.

- **Hilo de rasgado**

El hilo de rasgado es un hilo muy fino y fuerte que se encuentra justo por debajo de la cubierta del cable de fibra óptica y se utiliza para rasgar fácilmente su cubierta sin dañar su interior.

- **Miembro central**

El miembro central se utiliza para proporcionar fuerza y soporte al cable durante las operaciones de tendido del cable para asegurar éste al

orificio de tracción. Para instalaciones permanentes, se debe atar al anclaje que existe para tal cometido en las cajas de empalmes o en el panel de conexión.

- **Relleno intersticial**

El relleno intersticial es una sustancia gelatinosa que se encuentra en los cables de estructura holgada. Llena la protección secundaria y los intersticios del cable haciendo que éste sea impermeable al agua.

AP.4.1.2 Clasificación y tipos de cables ópticos

A lo largo del siguiente apartado, se detallarán los tipos de cables ópticos atendiendo a su estructura, atendiendo a su finalidad y modo de empleo, y atendiendo a la composición y estructura de su cubierta.

AP.4.1.2.1 Cables de estructura holgada

Un cable de estructura holgada consta de varios tubos de fibra (protecciones secundarias) rodeando un miembro central de refuerzo y rodeado de una cubierta protectora. El rasgo característico de este tipo de cable son los tubos de fibra.

Cada protección secundaria consiste en un tubo que posee unas dimensiones entre 2 y 3 mm de diámetro, espesor de 0,25 μm y está constituido por varias fibras ópticas que descansan holgadamente en él. Estas fibras suelen agruparse en grupos de 6, 8, 10 ó 12 y por regla general son ligeramente más largas que el propio cable, por lo que éste se puede alargar bajo cargas de tensión sin aplicar tensión a la propia fibra [30] [35].

Los tubos pueden ser huecos (aire) o pueden estar rellenos de un gel resistente al agua que impide que ésta entre en la fibra. A su vez, esta protección secundaria suelen ir junto con otras y un elemento de refuerzo central de acero o Kevlar® 49 -con un diámetro de entre 0.7 y 4 mm- dentro de una coraza de hilos de aramida e hilos rasgados rellena con un gel, que permite rasgar las cubiertas de los cables para conseguir su eliminación. El elemento de refuerzo central proporciona al cable aislamiento de las tensiones mecánicas propias de la instalación. Todo el conjunto anterior, se encuentra rodeado por una funda protectora de polietileno o PVC [30] [35].

Además, cada tubo está coloreado y numerado, así como cada fibra individual en el tubo para facilitar la identificación de los mismos acorde con un código de colores que se especifica más adelante en el apartado de estándares de cables ópticos.

Los cables de estructura holgada se utilizan en la mayoría de las instalaciones exteriores, incluyendo aplicaciones aéreas, en tubos o conductos y en instalaciones directamente enterradas. Algunos ejemplos de este tipo de estructura son los cables submarinos y los cables aéreos autoportantes o autosoportados. Sin embargo, no es adecuado para instalaciones en recorridos muy verticales, ya que existe la posibilidad de que el gel interno fluya a través del cable o que las fibras se muevan.

En la figura 189 se muestra una imagen del cable óptico con estructura holgada.

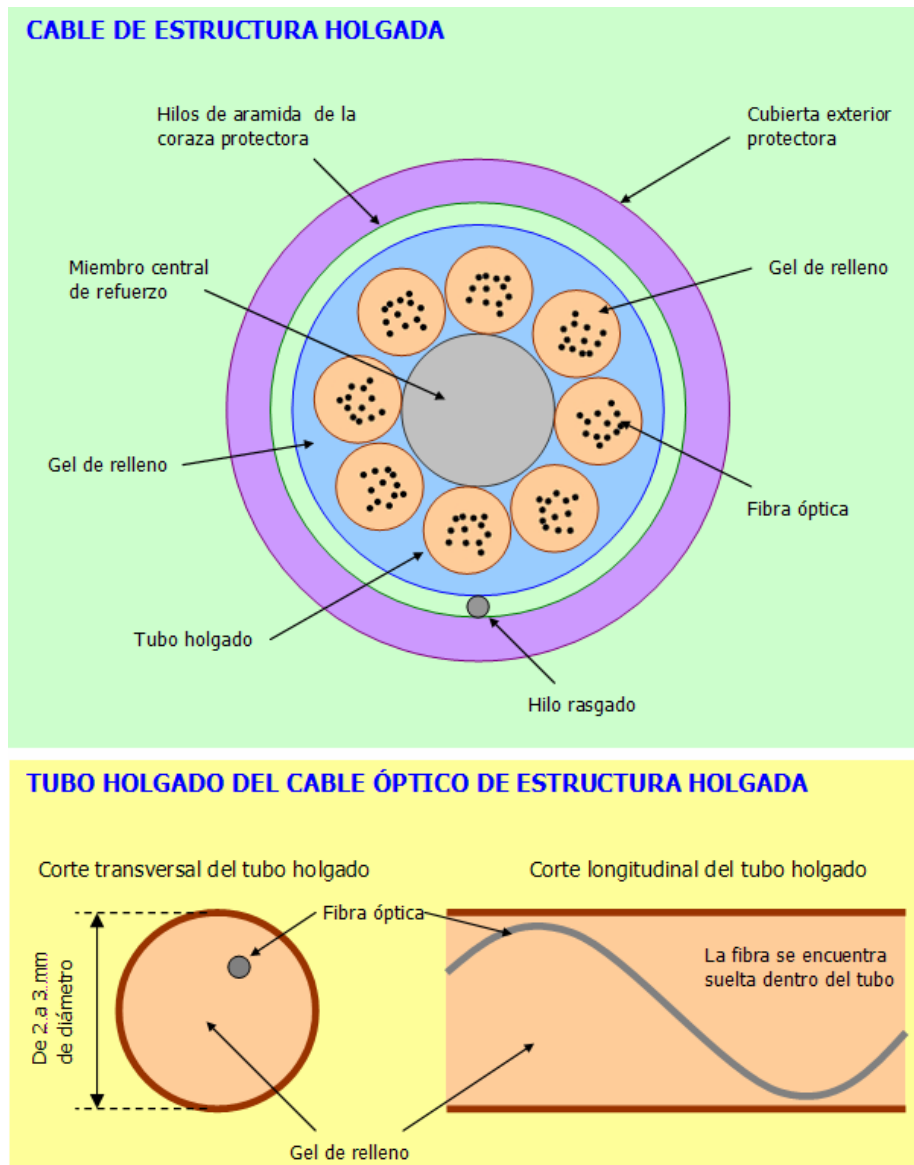


Figura 189: Cable de estructura holgada

AP.4.1.2.2 Cable de estructura ajustada o densa

Un cable de fibra óptica de estructura ajustada contiene varias fibras con protección secundaria que rodean un miembro central de tracción, y todo ello cubierto de una protección exterior. La protección secundaria de la fibra consiste en una cubierta plástica del orden de 900 μm de diámetro y espesor de entre 0.5 y 1 mm, que rodea al recubrimiento de 250 μm de la fibra óptica [35].

La protección secundaria proporciona a cada fibra de forma individual una protección adicional frente al entorno, así como un soporte físico permitiéndole a la fibra ser conectada directamente (conector instalado directamente en el cable de fibra),

sin la protección que ofrece una bandeja de empalmes. En algunas instalaciones este hecho puede reducir el coste de instalación y disminuir el número de empalmes en un tendido de fibra.

A su vez, esta protección secundaria suele ir junto con otras y un elemento de refuerzo central de acero o Kevlar® 49 -con un diámetro de entre 4 y 7 mm- dentro de una coraza de hilos de aramida e hilos rasgados rellena con un gel, que permite rasgar las cubiertas de los cables para conseguir su eliminación [35].

Además, debido al diseño ajustado del cable, es más sensible a las cargas de estiramiento o tracción, y puede ver incrementadas las pérdidas por microcurvaturas. En general, un cable de estructura ajustada es más flexible y tiene un radio de curvatura mayor que un cable de estructura holgada.

Se utilizan generalmente para instalaciones en el interior de edificios, así como también para instalaciones en tendidos verticales elevados, debido al soporte vertical del que dispone cada una de las fibras. Un ejemplo de cable con este tipo de estructura son los cables en abanico, que no requieren un panel de conexión.

A continuación se muestra una imagen en la figura 190 del cable óptico con estructura ajustada.

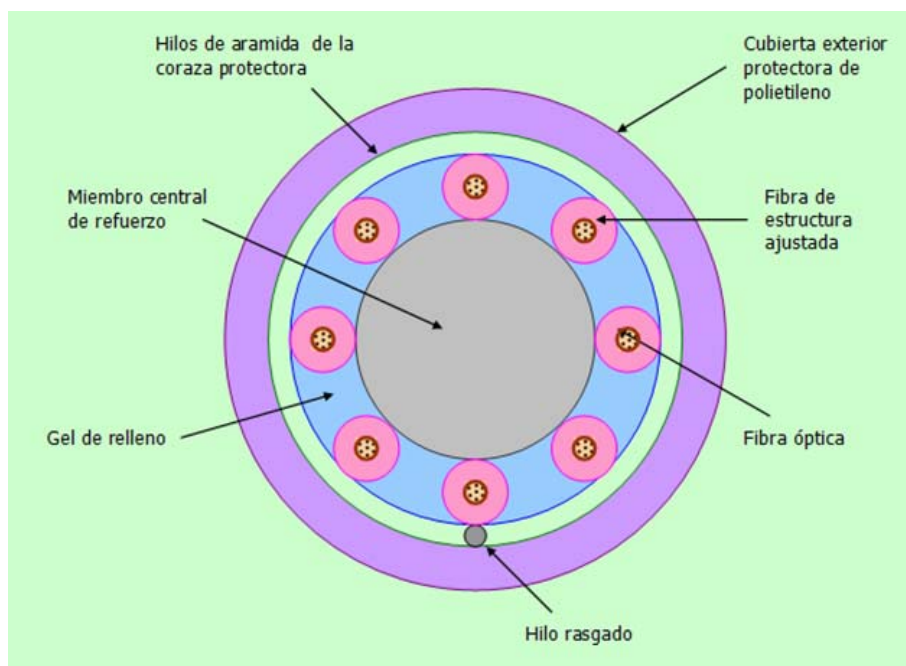


Figura 190: Cable de estructura densa

La siguiente tabla muestra un resumen comparativo entre las características más importantes de los cables con estructura holgada y cables con estructura ajustada [28] [30].

Características	Estructura holgada	Estructura ajustada
Número de fibras en la protección secundaria	Varias	Una
Protección contra humedad	Protección con gel	Sin protección
Flexibilidad	No flexibles	Flexibles
Conexión de las fibras ópticas	Laborioso	Sencillo
Radio de curvatura	Grande	Pequeño
Diámetro del cable	Grande	Pequeño
Resistencia a golpes y presiones	Menor	Mayor
Comportamiento con la temperatura	Mal comportamiento	Buen comportamiento
Densidad de las fibras	Alta	Baja

Figura 191: Características más importantes de los cables de estructura holgada y ajustada

AP.4.1.2.3 Otras estructuras de cable

Además de las estructuras holgada y ajustada de un cable, existen otras estructuras menos significativas. Algunos fabricantes determinan las estructuras que se exponen a continuación como casos particulares de las dos anteriores a los que se introducen variaciones o modificaciones, aunque su estructura general está basada en los mismos.

▪ Cable blindado

Los cables blindados poseen una coraza protectora o armadura de acero debajo de la cubierta de polietileno. Esto proporciona al cable una resistencia excelente al aplastamiento y propiedades de protección frente a roedores. Este cable se encuentra disponible generalmente en estructura holgada aunque también existen cables blindados en modo de estructura ajustada. Se utilizan frecuentemente en aplicaciones de enterramiento directo o para instalaciones en entornos de industrias pesadas [28].

En la figura 192 se muestra una imagen de un cable blindado de estructura holgada.

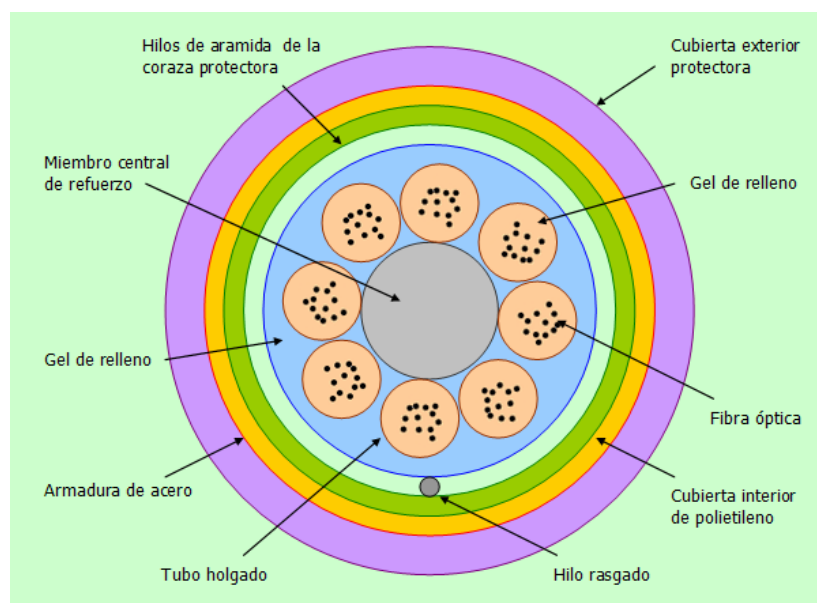


Figura 192: Cable blindado de estructura holgada

▪ ***Cable de figura en 8***

El cable de figura en 8 es un cable de estructura holgada con un cable fijador adosado. El cable fijado es el miembro soporte que se utiliza en las instalaciones aéreas. Generalmente es un cable de acero para alta tracción con un diámetro comprendido entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{5}{8}$ de pulgada [30].

Se utiliza en instalaciones aéreas y elimina la necesidad de atar el cable a un fijador preinstalado. El fijador se encuentra disponible en acero para alta tracción o en un material completamente dieléctrico.

▪ ***Cable aéreo autosoportado o autoportante***

El cable aéreo autosoportado es un cable de estructura holgada diseñado para ser utilizado en estructuras aéreas. No requiere un fijador como soporte, y para asegurar el cable directamente a la estructura del poste se utilizan abrazaderas especiales. El cable se sitúa bajo tensión mecánica a lo largo del tendido.

▪ ***Cable submarino***

El cable submarino es un cable de estructura holgada diseñado para permanecer sumergido en el agua. Actualmente muchos continentes están conectados por cables submarinos de fibra óptica transoceánicos.

▪ ***Cable compuesto tierra-óptico (OPGW)***

El cable OPGW es un cable de tierra que posee fibras ópticas insertadas dentro de un tubo en el núcleo central del cable. Las fibras ópticas están completamente protegidas y rodeadas por pesados cables de tierra. Se utiliza por las compañías eléctricas para suministrar comunicaciones a lo largo de las rutas de alta tensión.

▪ ***Cable híbrido***

El cable híbrido es un cable que contiene tanto fibras ópticas como pares de cobre. Este tipo de cable es muy utilizado en tecnología de cable HFC por operadoras de cable.

▪ *Cable en abanico*

El cable en abanico es un cable de estructura ajustada con un número pequeño de fibras y diseñado para una conectorización directa y fácil (no se requiere un panel de conexiones). Se utiliza fundamentalmente para aplicaciones interiores, tales como redes de área local.

AP.4.1.3 Clasificación de los cables ópticos según su cubierta

Uno de los elementos más importantes de los cables ópticos es la composición de la cubierta protectora del cable, que confiere a la fibra protección mecánica frente a esfuerzos, temperaturas y ataques químicos o biológicos.

Todos los tipos de cubiertas, deben suponer en menor o mayor medida, la inclusión de diferentes características en el cable óptico. Las propiedades más demandadas en los cables actualmente son las que se enumeran a continuación [30]:

- Baja emisión de humos (LS)
- Retardo de propagación de la llama (RC)
- No inflamables
- Auto extingüibles
- Emisión cero de halógenos (LSZH)
- Totalmente dieléctrico
- Antirroedores
- Resistencia a UV
- Antihumedad
- Alta flexibilidad
- Estanco

En función de las características anteriores, se diseñan las diferentes cubiertas de los cables, capacitados para cubrir las necesidades requeridas. Así pues, se establece una clasificación general de los cables ópticos en función de ellas que se detalla a continuación [28] [30].

▪ *Cables con cubierta PEAP*

La cubierta de los cables PEAP está constituida por tres compuestos en el siguiente orden de interior a exterior: polietileno de baja densidad, estanca aluminio y polietileno de alta densidad. Este tipo de cable no se instala en la actualidad, dado que se encuentra desfasado. El elemento de refuerzo central está constituido por una sirga de acero situada en la parte central axial del cable.

- ***Cables con cubierta PESP***

Los cables con cubierta PESP están constituidos por tres compuestos en el siguiente orden de interior a exterior: polietileno de baja densidad, estanca acero y polietileno de alta densidad. Este tipo de cable tampoco se instala en la actualidad, dado que se encuentra desfasado. El elemento de refuerzo central y su disposición en el cable es idéntico que el cable PEAP.

- ***Cables con cubierta PKP***

Los cables con cubierta PKP están constituidos por tres compuestos en el siguiente orden de interior a exterior: polietileno de baja densidad, fibras de aramida y polietileno de alta densidad. Este tipo de cable es el más utilizado en la actualidad. El elemento de refuerzo central está constituido por hilaturas de aramida dispuestas en hélice sobre la cubierta interior de polietileno.

- ***Cables con cubierta PKESP o PKASP***

Los cables con cubierta PKESP o PKASP están constituidos por cuatro compuestos en el siguiente orden de interior a exterior: polietileno de baja densidad, fibras de aramida, estanca acero y polietileno de alta densidad. A día de hoy ha sido sustituido por los cables autosoportados PKCP. El elemento de refuerzo central está constituido por hilaturas de aramida distribuidas en capas y dispuestas en paso de hélice sobre la cubierta interior de polietileno. Éstas tienen un gran poder de absorción de los impactos por lo que a esta cubierta también se la denomina como cubierta anticazadores.

- ***Cables con cubierta PKCP***

Los cables con cubierta PKCP están constituidos por cuatro compuestos en el siguiente orden de interior a exterior: polietileno de baja densidad, fibras de aramida, cintas de material antibalístico y polietileno de baja densidad. El elemento de refuerzo central está constituido por hilaturas de aramida dispuestas en hélice sobre la cubierta interior de polietileno. Sobre las fibras de aramida se colocan una o varias cintas de material resistente a impactos balísticos. Por último cabe destacar que los tubos que contienen las fibras, van en paso S-Z, sustituyendo estos cables a los originales PKESP. Este cable, al igual que los anteriores, es autosoportado.

- ***Cables con cubierta PUKPU***

Los cables con cubierta PUKPU están constituidos por tres compuestos en el siguiente orden de interior a exterior: poliuretano, fibras de aramida y poliuretano. El elemento de refuerzo central está constituido por hilaturas de aramida distribuidas en capas y dispuestas en paso de hélice sobre la cubierta interior de poliuretano. La cubierta exterior de estos cables es de color naranja, y solo se suele utilizar en labores de conservación.

- ***Cables con cubierta TKT***

Los cables con cubierta TKT están constituidos por tres compuestos en el siguiente orden de interior a exterior: termoplástico, fibras de aramida y termoplástico. El elemento de refuerzo central está constituido por hilaturas de aramida distribuidas en capas y dispuestas en paso de hélice sobre la cubierta interior de termoplástico. El termoplástico será de un material ignífugo, poliuretano o similar. La cubierta exterior de estos cables es de color amarillo en los cables de fibra óptica monomodo, y verde en los multimodo. A estos cables también se les denomina cables para interiores.

- ***Cables con cubierta KT***

Los cables cubierta KT están constituidos por dos compuestos en el siguiente orden de interior a exterior: fibras de aramida y termoplástico. El elemento central de refuerzo está constituido por hiladuras de fibra de aramida dispuestas en forma de hélice sobre el núcleo. La cubierta exterior de éstos es de color negro. Por su estructura suelen también denominarse como cables de acometida.

Los cables monofibra también tienen este tipo de cubierta, y dependiendo de si son monomodo o multimodo la cubierta exterior ignífuga será amarilla o verde respectivamente. Estos cables monofibra se utilizan en las centrales, en los puntos de red, y en general en aquellos lugares donde se requiera disponer de conectores para efectuar medidas o tener flexibilidad en la red.

La segunda protección de las fibras ópticas de los cables de acometida es holgada, mientras que la de los cables monofibra es ajustada.

AP.4.2 Empalmes ópticos

Existen diversas técnicas de empalmes de fibra óptica, que intentan optimizar la unión física entre fibras, intentando reducir al mínimo los efectos descritos anteriormente. A continuación se muestra una clasificación breve sobre las técnicas de empalmes ópticos más comunes.

AP.4.2.1 Técnicas de empalmes ópticos

Las uniones de fibra a través de empalmes se pueden realizar fibra a fibra, es decir, a través de empalmes simples; o se pueden realizar a través de empalmes múltiples, solución muy práctica en caso de cables con gran número de conductores.

Los requisitos fundamentales que deben cumplir los distintos métodos de conexión de fibras se pueden resumir en: reducida degradación de las propiedades de transmisión de la fibra (bajas pérdidas de conexión y/o reflexiones), alta fiabilidad de la conexión, manejo sencillo incluso para su realización en campo por parte de operarios e instaladores y, finalmente, bajo coste.

Esta unión o conexión se puede realizar utilizando varios métodos: empalme por fusión, empalme mecánico o empalme con pegamento.

AP.4.2.1.1 Empalmes por fusión

Los métodos de empalme por fusión utilizan una fuente de calor para fundir y unir las fibras ópticas. A diferencia de otros métodos que utilizan materiales de adaptación o adhesivos, en este caso no existe ningún otro material más que la propia fibra en la región del empalme. Por lo tanto, este método posee inherentemente bajas pérdidas por reflexión y alta fiabilidad.

El empalme por fusión consiste en alinear con precisión los extremos a unir, generando un arco eléctrico para soldarlos, proporcionando bajas pérdidas tanto para fibras monomodo como multimodo. Para ello, se quitan las cubiertas de las fibras y se cortan a 90°. Ambas fibras se sitúan con una cierta separación entre ellas en una máquina empalmadora de fibras y se pulsa un botón para comenzar el proceso, para poder alinear los núcleos de una y otra. Hasta este punto el trabajo se realiza manualmente por parte de un operario. En el momento de pulsar el botón de la máquina, ésta comienza a mover las fibras para reducir la separación entre las mismas. Durante el movimiento de las fibras, se genera una descarga eléctrica que se mantiene durante un período de tiempo predeterminado. Dicha descarga, no es más que un arco eléctrico producido entre dos electrodos y tiene lugar de forma automática en la máquina empalmadora. Por último, la región donde se ha producido el empalme se protege para facilitar el manejo de la fibra. Actualmente existen máquinas completamente automáticas que realizan todas las acciones: desde quitar las cubiertas hasta proteger el empalme. Las atenuaciones que se producen por este método son bajas, oscilando entre los 0,01 y 0,1 dB [30] [35].

Existen diversos métodos de empalme de fibras ópticas por fusión, todos ellos clasificados en base al tipo de fuente de calor utilizada: una descarga eléctrica, un láser gaseoso o una llama. El primero de ellos es el más ampliamente utilizado en el caso de fibras de sílice. En especial, se han desarrollado varias técnicas para realizar empalmes por medio de descarga eléctrica, tales como el método de prefusión, el método de

descarga de alta frecuencia con un elevado voltaje de *trigger* (HHT), y el método de calentamiento uniforme para realizar empalmes de múltiples fibras [30].

- **Corte de la fibra y método de prefusión**

La calidad obtenida en el extremo de la fibra tras el corte afecta a las pérdidas del empalme posterior, resultando difícil obtener superficies pulidas mediante la técnica de empalme por fusión directa. Por este motivo, se han propuesto diversas técnicas de corte de fibras que no utilizan máquina de pulir. En cuatro de estas técnicas, a la fibra se le hace una muesca y posteriormente se dobla para realizar el corte. Entre las distintas posibilidades para producir dicha muesca se encuentran: un filo de cuchilla, una descarga eléctrica, un alambre caliente o un láser de CO₂. Incluso existe otra posibilidad que consiste en realizar una muesca y tirar posteriormente de la fibra sin doblarla. De entre todos los métodos, el más ampliamente utilizado es el basado en la muesca con cuchilla o elemento similar y posterior doblez de la fibra [28] [30].

Aparte de otros factores de pérdidas más comunes presentes al realizar empalmes, tales como desplazamiento lateral o inclinación, el único factor de pérdidas en el caso del método de empalme por fusión es la formación de burbujas confinadas entre ambos extremos de las fibras. Cuando se produce esto, las burbujas introducen elevadas pérdidas de unos pocos decibelios o incluso más. En los procedimientos de empalme anteriores a la existencia del método de prefusión, ambas fibras se presionaban ligeramente y posteriormente se fusionaban por medio de una descarga eléctrica. Sin embargo, cuando los extremos de las fibras no eran lisos se producían desplazamientos laterales y dobleces, además de una mayor probabilidad de formación de burbujas como consecuencia del confinamiento de aire entre las superficies rugosas. Precisamente para evitar todo esto se propuso el método de prefusión.

El procedimiento consiste en situar los extremos de ambas fibras con una separación de unas micras y posteriormente prefusionarlos con una descarga eléctrica, lo que produce unas superficies lisas. Entonces éstas se desplazan y presionan bajo la descarga. Tras tocarse los extremos, ambas fibras permanecen presionadas debido al movimiento, mientras el calentamiento, por otro lado, continúa incluso una vez que ha cesado el desplazamiento. El tiempo de descarga para la prefusión es inferior a 1 segundo. Sin embargo, el tiempo global de descarga es de unos pocos segundos y para fibras monomodo resulta relativamente pequeño en comparación con el necesario para fibras multimodo.

Con este método se obtienen bajas pérdidas en la región del empalme incluso para superficies no perfectas. Dado que es difícil obtener superficies perfectamente pulidas fuera del laboratorio, este método resulta beneficioso en la construcción de una máquina empalmadora para estos fines.

- **Método HHT**

En la práctica existen dos tipos de descargas eléctricas que se clasifican en descarga de corriente continua (DC) y descarga de corriente alterna (AC). En general, una descarga AC se prefiere sobre una descarga DC. En el caso de una descarga DC

solamente se gasta un electrodo, mientras que en la descarga AC se gastan simultáneamente y de forma simétrica los dos electrodos. El método HHT pertenece precisamente al grupo de descargas AC, y como se verá a continuación una descarga de alta frecuencia posee propiedades beneficiosas [30].

En el circuito de alimentación utilizado en el método HHT, un voltaje DC de entrada de 12 V se convierte a una señal pulsante de frecuencia 20-40 kHz mediante conmutación empleando dispositivos semiconductores. Estas frecuencias de trabajo son bastante comunes en el caso de circuitos de alimentación de potencia y existen gran cantidad de componentes semiconductores disponibles. El generador de disparo situado a la salida de un transformador y compuesto de diodos y condensadores se encarga de activar los electrodos de descarga. Finalmente, existe un circuito de realimentación para el control de la conmutación [30].

En ciertos experimentos comparativos utilizando descargas eléctricas de baja y de alta frecuencia se han medido características diferenciadoras en cuanto a su eficiencia. Los experimentos se han llevado a cabo para unas frecuencias de descarga de 50 Hz y 20 kHz, con una separación entre electrodos de 1,5 mm. Las distribuciones espaciales de la descarga obtenidas en ambos casos presentaban un perfil prácticamente gaussiano. Sin embargo, en el caso de la descarga a 20 kHz se obtenían valores de pico inferiores y anchuras espaciales superiores que para la descarga a 50 Hz. Esto significa que la descarga a 20 kHz produce una distribución espacial de la energía más plana (distribución de calor más uniforme y estable que la descarga de baja frecuencia), lo cual es deseable en el caso de realizar empalmes de múltiples fibras simultáneamente [28] [30].

• Técnicas de alineamiento de fibras

Tanto los métodos de prefusión como de descarga estable son importantes para conseguir bajas pérdidas en los empalmes. Sin embargo, también resulta crucial un buen alineamiento previo de las fibras. Las distintas técnicas de alineamiento pueden clasificarse en fijas y móviles.

En la técnica fija las fibras no se desplazan lateralmente, sino que éstas se sitúan en posiciones predeterminadas. Este método se conoce también como alineamiento pasivo y es ampliamente utilizado en las máquinas empalmadoras debido a su simplicidad. Cuando se utilizan fibras con una excentricidad de núcleo pequeña, este método es válido no sólo para fibras multimodo sino también para fibras monomodo. Dado que las tecnologías de fabricación de fibras han mejorado en la actualidad, es posible conseguir empalmes de varias fibras monomodo de forma simultánea con valores de pérdidas inferiores a 0,05 dB utilizando máquinas que emplean esta técnica [30].

En cambio, en las técnicas móviles las fibras se desplazan lateralmente hasta obtener posiciones precisas previamente a la descarga. Este método se conoce también con el nombre de alineamiento activo. Hasta la fecha se han propuesto múltiples técnicas para realizar el alineamiento, especialmente durante las primeras fases de desarrollo de los empalmes de fibras monomodo, las cuales presentaban una elevada excentricidad en el núcleo en comparación con las fibras actuales.

Una de estas técnicas es la de monitorización de la potencia óptica, la cual se basa en la medida de la potencia óptica transmitida para realizar el alineamiento. Existen tres posibilidades dependiendo de los puntos del sistema que se utilizan para realizar la medida [30]:

- En la técnica de tres puntos se utilizan una fuente óptica, una máquina de empalme y un detector situados en tres puntos diferentes del sistema. En este caso, para hacer uso de la potencia óptica detectada para alinear las fibras se requiere un dispositivo transmisor y unos cables metálicos. Con este método se han obtenido valores de pérdidas por empalme de unos 0,1 dB con una desviación típica de 0,08 dB.
- En la técnica de dos puntos se sitúa un detector cerca o en la propia máquina empalmadora. De este modo, el equipamiento solamente se coloca en dos puntos del sistema y la potencia óptica transmitida se detecta localmente por medio de la radiación que produce una curvatura de la fibra.
- En la técnica de un punto se colocan todos los componentes en el mismo emplazamiento. Tanto la inyección como la detección de potencia se realiza en la mayoría de los casos por medio de la curvatura de la fibra.

Los métodos visuales son otra de las técnicas no fijas de alineamiento de fibras. En una de las técnicas se utiliza un microscopio para observar en una dirección o en dos direcciones perpendiculares los diámetros exteriores de las dos fibras. Para observar las dos direcciones se coloca un espejo cerca de las fibras. La imagen aumentada puede verse directamente o indirectamente, en este último caso a través de un monitor de TV y una cámara.

Dado que para el alineamiento se utiliza como referencia el diámetro exterior de las fibras, esta técnica es poco eficiente en el caso de fibras monomodo con excentricidad en el núcleo. Para ello debería utilizarse algún método de monitorización directa del núcleo, como por ejemplo: el uso de la fluorescencia de un núcleo de sílice dopado con germanio y excitado con luz ultravioleta, el uso de un microscopio de contraste por interferencia diferencial, el uso de un divisor de haz y luces inyectadas en ambas direcciones o el uso de un microscopio ordinario [28].

Finalmente, la técnica basada en la utilización de un sensor de luz también pertenece al conjunto de técnicas móviles. En esta técnica se detectan las posiciones de las fibras en dos direcciones perpendiculares por medio de dos sensores de luz por cada fibra, por lo que son necesarios cuatro sensores en total.

En las técnicas móviles resulta imprescindible la presencia de mecanismos muy precisos para realizar los movimientos finos que se precisan durante el alineamiento. Algunos mecanismos propuestos consisten en una plataforma móvil de precisión controlada por un motor, un dispositivo piezoeléctrico o un dispositivo de deformación elástica. Las características de linealidad en el movimiento, desplazamiento máximo y tamaño dependen de la técnica de alineamiento y del diseño de la máquina empalmadora [28] [30].

AP.4.2.1.2 Empalmes mecánicos

El empalme mecánico es una técnica alternativa que no requiere una empalmadura de fusión, sino que utiliza un pequeño conector que se encarga de alinear los extremos a unir de manera precisa, asegurándolas mecánicamente. A diferencia de las técnicas ya analizadas, el empalme mecánico no se basa en la generación de calor.

La técnica básica utiliza ranuras en V realizadas en distintos materiales, tanto duros como blandos. En el caso de materiales blandos es posible realizar empalmes entre fibras de diferente diámetro, ya que el material se deforma para hacer coincidir los centros de ambos núcleos. El método usual de alineamiento que se utiliza es el fijo (alineamiento pasivo) [35].

La clave de este método se basa en un sustrato preciso de baja pérdida y con fiabilidad a largo plazo. Existen multitud de materiales propuestos, tales como silicio, metales, plásticos y acero. Cuando el coeficiente de dilatación térmica del sustrato es similar al de las fibras de sílice, resulta fácil eliminar la variación de las pérdidas con la temperatura y asegurar una fiabilidad a largo plazo [35].

Generalmente suelen emplearse materiales de adaptación entre las fibras para reducir las pérdidas del empalme y las reflexiones. Aunque las pérdidas del empalme no son sensibles al índice de refracción, la reflexión sí que resulta muy sensible. Por lo tanto, se necesita una adaptación de índices muy precisa para suprimir las reflexiones. Cuando se requiere muy baja reflexión, también debe tenerse en cuenta la variación con la temperatura del índice de refracción del material de adaptación. Algunos ejemplos de materiales de adaptación serían el gel y resina de silicio, adhesivos fotosensibles o resinas de epoxy [30] [35].

Una unión mecánica utiliza una fuerza mecánica para mantener el alineamiento de las fibras, por lo que existe la posibilidad de volver a conectarse (reconfiguración). No obstante, resulta generalmente bastante difícil en comparación con un conector óptico, aunque resumidamente puede resaltarse que este tipo de empalmes actúan como conectores ópticos.

AP.4.2.1.3 Empalmes con adhesivos

El empalme con pegamento o adhesivos consiste en conexionar las fibras a través de pegamentos rápidos, tales como la resina epóxica, que presentan como inconveniente la degradación de este adhesivo con el tiempo. Por lo tanto, este tipo de empalme tampoco se basa en la generación de calor. Una unión adhesiva utiliza un material adhesivo para cumplir la función de mantener alineadas las fibras. En este sentido es similar a un empalme por fusión, dado que tiene la característica de ser permanente.

Para reducir las pérdidas del empalme y las reflexiones, al igual que ocurre en los empalmes mecánicos, es necesario introducir materiales de adaptación entre las fibras, aunque se prefiere que el propio adhesivo sirva simultáneamente como material de unión y de adaptación.

AP.4.3 Conectores ópticos

Existen en el mercado una gran variedad de conectores de fibra óptica debido a la complejidad del problema de unión entre dos fibras ópticas y a la gran cantidad de fibras diferentes existentes. Los conectores que habitualmente se utilizan para terminar una fibra óptica son los que se detallan a continuación.

AP.4.3.1 Conector ST (*Straight Tip*)

El conector ST se trata de un conector metálico, con férula de cerámica y sujeción a bayoneta. Es un buen conector en términos de pérdidas, y aunque se utiliza tanto para conexiones de fibra monomodo como multimodo, aporta mejores resultados a éstas últimas, con pulido convexo PC.

Pueden conectarse por crispado mecánico o por soldadura por material epoxy, las pérdidas en promedio rondan los 0.5 dB. Posee una conexión con cierre en giro que no pierde en ambiente con vibraciones. Es un conector estándar para la mayoría del equipamiento de red de área local (LAN) de fibras ópticas, y posee varias medidas encontrándose entre las más comunes 0.9 y 3 mm de diámetro [35].

A continuación se muestran varias imágenes en la figura 193 de diferentes tipos de conectores ST [35] [44].



Figura 193: Conectores ST

AP.4.3.2 Conector SC (*Standard connector*)

El conector SC se trata de un conector de plástico, con férula de cerámica y sujeción *push-pull*. Es un buen conector en términos de pérdidas, y se utiliza tanto para fibras multimodo como para monomodo [30].

La fijación al adaptador tiene lugar mediante un sistema de clip, y su perfil cuadrado puede tener tamaño doble del de RJ 45 (SC Standard EIA/TIA 568) o ser similar a RJ 45 (SC-DC/SC-QC). Presenta idénticas dimensiones externas para SM o MM y se puede obtener con pulido de férula PC y APC [35].

Los conectores SC se comercializan en tres colores diferentes: azul, para fibras monomodo; beige para fibras multimodo; y verde para fibras de larga distancia, generalmente monomodo. Además poseen varias medidas al igual que ocurre con los conectores ST, pudiendo ser simplex (conectorización para una fibra) o duplex (conectorización para dos fibras). Posee unas pérdidas bajas, en promedio alrededor de 0.5 dB [28] [35].

A continuación se muestran varias imágenes de diferentes tipos de conectores SC [35] [44].



Figura 194: Conectores SC

AP.4.3.3 Conector FC (*Ferrule connector*)

El conector FC es muy similar al conector ST pero roscado. Se trata de un conector con propiedades bastante buenas en cuanto a pérdidas se refiere, y únicamente se suele

utilizar en conexión y terminación de fibras monomodo. Está constituido por un cuerpo metálico y una férula de zirconio, que le confiere mayor durabilidad y repetitividad. También se le conoce como FC-PC, dado que el pulido de la férula es siempre PC [30] [35].

Las pérdidas en promedio de este conector rondan los 0.4 dB, lo que lo convierte en conector atractivo para servicios en los que sea crítico el tener un medio con elevadas pérdidas, como puede ser la industria de la televisión por cable (CATV) [28].

A continuación se muestran varias imágenes de diferentes tipos de conectores FC [35] [44].



Figura 195: Conectores FC

AP.4.3.4 Conector LC

Desarrollados en 1997 por Lucent Technologies, los conectores LC pertenecen a la familia de los SFFC (*Small Form Factor Connectors*), tienen un aspecto exterior similar a un pequeño SC, con el tamaño de un RJ 45 y se presentan en formato simplex o duplex, diferenciándose externamente los de tipo multimodo de los de tipo monomodo por un código de colores, que se corresponde con un diámetro interno de la férula de 125.5 o 128 μm [28].

El conector LC con férula de 1,25 mm., puede encontrarse en monomodo con pulido PC o APC, y proporciona unas pérdidas de inserción optimizadas (0,10 dB máximo). En multimodo también se encuentra como PC o APC, con unas pérdidas inferiores a 0.15 dB. Es por ello que se suelen utilizar para transmisión de alta densidad de datos [30].

A continuación se muestran varias imágenes de diferentes tipos de conectores LC [35] [44].

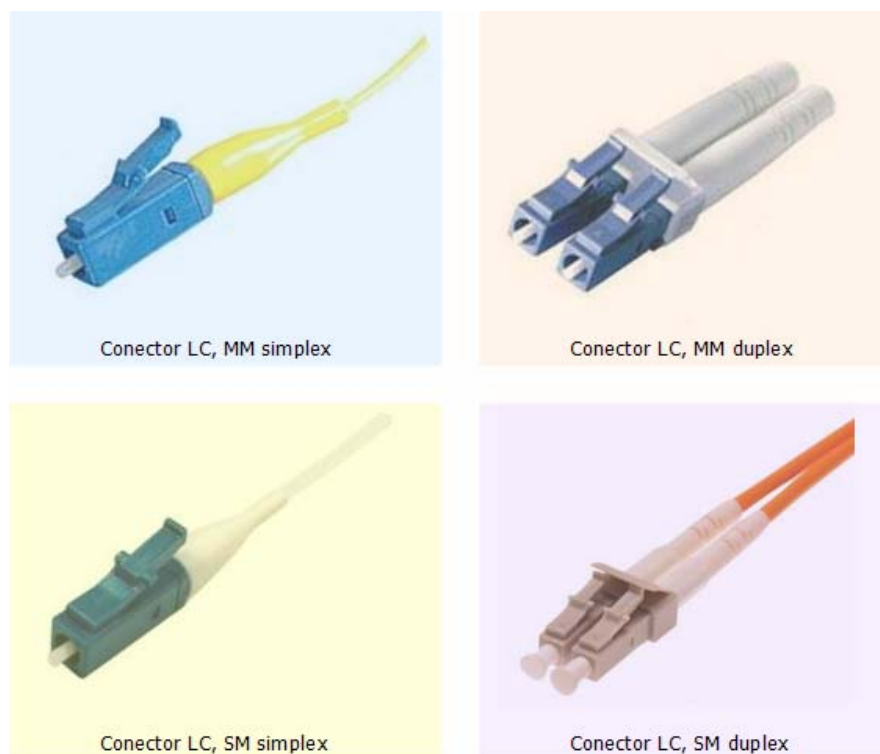


Figura 196: Conectores LC

AP.4.3.5 Conector bicónico

El conector bicónico es un conector obsoleto utilizado para las fibras multimodo únicamente. Posee una repetitividad muy pobre, es muy susceptible a vibraciones y posee elevadas pérdidas, que superan el 1 dB. No se suele utilizar en ninguna instalación a día de hoy, salvo en aquellas que requieran un coste de inversión muy bajo [28]. A continuación se muestra una imagen de un tipo de conector biónico [44].



Figura 197: Conector bicónico

AP.4.3.6 Conector SMA (*SubMiniature A*)

El conector SMA es un conector también obsoleto, pero que en la actualidad todavía es utilizado en algunos equipos de fibra óptica. Posee elevadas pérdidas, del orden de 0.9 dB, aunque a cambio poseen un bajo coste de adquisición [30].

Existen dos tipos de conectores SMA, el SMA905 que tiene un casquillo recto; y el SMA906 que posee un casquillo en escalón. También es posible encontrar una versión del SAM905 con un collar en el casquillo que se puede enroscar y convertirlo en un SMA906. Este tipo de conector es utilizado principalmente en fibras monomodo [28] [30]. En la figura 198 se muestra una imagen de un tipo de conector SMA [44].



Figura 198: Conector SMA

AP.4.3.7 Conector FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*)

El conector FDDI es un conector estándar de fibra óptica para redes FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*). Es un conector de tipo dúplex con llave, conectando dos fibras a la vez en su parte trasera. El conector FDDI lleva una ferrita flotante de 2.5 mm y un recubrimiento fijo para minimizar la pérdida de luz [28]. A continuación se muestra una imagen de un tipo de conector FDDI (figura 199) [44].



Figura 199: Conector FDDI

AP.4.3.8 Conector D4

El conector D4 es un nuevo conector modular de alta densidad. Posee bajas pérdidas, inferiores a 0.5 dB y es bastante común en instalaciones monomodo [28].

A continuación se muestra una imagen de un tipo de conector D4 [44].



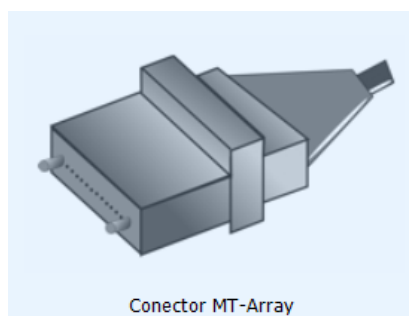
Conector D4, MM simplex

Figura 200: *Conector D4*

AP.4.3.9 Conector MT-Array

El conector MT-Array es muy utilizado en transmisiones de alta densidad de datos. Posee en promedio unas pérdidas superiores a los conectores LC, del orden de 0.2 dB. Se encuentra disponible tanto para fibras multimodo como monomodo, y posee una configuración inicial duplex [28].

A continuación se muestra una imagen de un tipo de conector MT-Array [69].



Conector MT-Array

Figura 201: *Conector MT-Array*

AP.4.3.10 Fibra desnuda

El conector de fibra desnuda se utiliza para conectar una fibra inacabada, generalmente cuando se desea una conexión temporal para probar fibras desnudas. Puede requerir un líquido adaptador de índice para conseguir una conexión de bajas pérdidas. No es recomendable para conexiones permanentes.

En la figura 202 se muestra una tabla comparativa con algunos de los conectores de fibra más utilizados en las instalaciones. En ella, se pueden observar los parámetros más importantes de cada tipo de conector, así como las aplicaciones más usuales en las que se instalan.


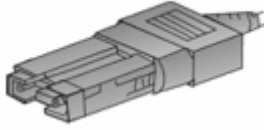
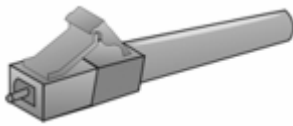
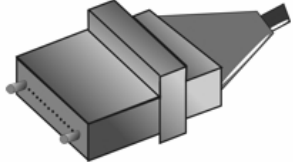
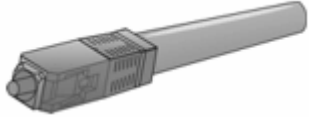
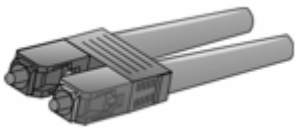

Conector	Pérdidas de inserción	Repetitividad	Tipo de fibra	Aplicaciones
 FC	0.5 – 1 dB	0.2 dB	SM, MM	Comunicaciones de datos, Telecomunicaciones
 FDDI	0.2 – 0.7 dB	0.2 dB	SM, MM	Redes de fibra óptica FDDI
 LC	0.15 (SM) 0.1 (MM)	0.2 dB	SM, MM	Interconexiones de alta densidad
 MT-Array	0.3 – 1 dB	0.25 dB	SM, MM	Interconexiones de alta densidad
 SC	0.2 – 0.45 Db	0.1 dB	SM, MM	Comunicaciones de datos
 SC Duplex	0.2 – 0.45 Db	0.1 dB	SM, MM	Comunicaciones de datos
 ST	0.4 dB (SM) 0.5 dB (MM)	0.4 dB (SM) 0.2 dB (MM)	SM, MM	Edificios planta externa e interna, seguridad, naval

Figura 202: *Tabla comparativa con los conectores de fibra habituales*

AP.4.4 Acopladores ópticos

Los acopladores actúan como pequeñas cajas de tambor que reciben un conector de cada lado produciendo una adaptación o acople óptico con la mínima pérdida posible para el enlace. Actúan por tanto como distribuidores o combinadores de señal, realizando multiplexaciones y demultiplexaciones en longitud de onda, la construcción

de otros componentes ópticos e incluso la monitorización de sistemas. A continuación se detalla el principio de funcionamiento de los acopladores ópticos.

AP.4.4.1 Principio de funcionamiento de un acoplador

Los acopladores están caracterizados matemáticamente por la denominada matriz de dispersión, que expresa la relación entre los campos eléctricos de cada puerto de salida con los campos eléctricos de las entradas. Por tanto, el tamaño de la matriz depende directamente del número de puertos que posea el acoplador [36]:

$$S = \begin{pmatrix} \sqrt{1-\alpha} & j\sqrt{\alpha} \\ j\sqrt{\alpha} & \sqrt{1-\alpha} \end{pmatrix} \quad (100)$$

El parámetro α se denomina coeficiente de acoplamiento o de acoplo, y determina cuanta potencia se dirige a cada puerto de salida. La potencia óptica acoplada de una fibra a otra puede ser variada, modificando la longitud de la región de acoplamiento y el grado de reducción del radio de la fibra (como se muestra en la figura el radio de las fibras que se forman el acoplador se reduce gradualmente antes de la región de acoplamiento), entre otros parámetros.

A continuación se muestra una imagen genérica en la figura 203 de la estructura de un acoplador de 1x2, o también denominado divisor o *splitter*.

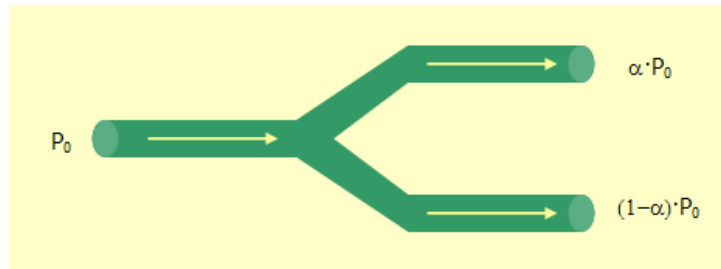


Figura 203: Estructura de un divisor

Se puede resumir el funcionamiento general de cualquier acoplador a través de una estructura genérica como la anterior, pero de 2x2 (es decir, 2 entradas y 2 salidas). Una forma común de construir un acoplador es fundiendo dos fibras, tal y como se muestra en la siguiente figura:

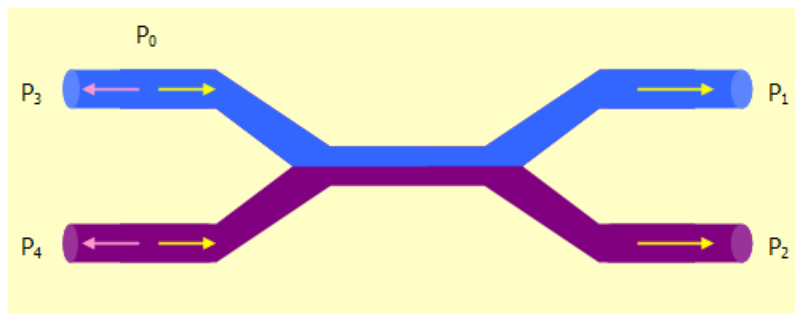


Figura 204: Acoplador constituido por dos fibras

En la figura 204, se observan dos fibras, una de color azul y otra de color violeta, ambas fundidas. El parámetro P_0 es la potencia de entrada al acoplador de 2x2. Parte de esa potencia se transmite a los puertos de salida, P_1 (potencia transmitida por la fibra 1 azul) y P_2 (potencia acoplada a la fibra 2 violeta procedente de la fibra 1 azul).

Sin embargo, no toda la potencia se transmite en el mismo sentido, sino que al existir dos fibras distintas, se producen variaciones en la composición del medio de transmisión y, por lo tanto, se producen reflexiones, reflejando una pequeña parte de la energía de entrada P_0 hacia las entradas P_3 y P_4 . Estos valores reflejados suelen estar comprendidos entre -50 dB y -70 dB por debajo de la potencia de entrada [38].

En este tipo de dispositivos el coeficiente de acoplamiento depende de la longitud de onda de la señal óptica, por lo que se denominan acopladores selectivos en frecuencia. Aunque se pueden construir acopladores totalmente independientes de la longitud de onda, éste es el caso más común y el que supone menor coste. La principal utilidad de los acopladores selectivos en frecuencia consiste en acoplar un láser de bombeo en un amplificador de fibra dopada con erbio EDFA (*Erbium Dope Fiber Amplifier*) [39].

AP.4.4.2 Parámetros de un acoplador

Los parámetros más importantes que caracterizan a un acoplador cualquiera de N puertos de salida P_N y un puerto de entrada P_{in} son los que se muestran a continuación [36]:

- El coeficiente de acoplamiento de un puerto i :

$$\alpha_i = \frac{P_i}{P_1 + P_2 + \dots + P_N} \quad (101)$$

- Pérdidas en exceso o EL (*excess loss*), es decir, las pérdidas del dispositivo:

$$EL = -10 \log \left(\frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{P_0} \right) \quad (102)$$

- Pérdidas en inserción o IL (*insertion loss*), es decir, las pérdidas asociadas al recorrido de un camino concreto:

$$IL_i = -10 \log \left(\frac{P_i}{P_0} \right) \quad (103)$$

- Pérdidas en retorno o RL (*return loss*), es decir, mide el aislamiento entre la potencia de entrada y la potencia óptica reflejada en el mismo puerto

$$RL_i = -10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_i} \right) \quad (104)$$

- Pérdidas puerto cruzado o *Crosstalk*, es decir, mide el aislamiento entre la potencia de entrada y la potencia óptica reflejada en otro puerto cualquiera j.

$$Crosstalk_{i,j} = -10 \log \left(\frac{P_j}{P_i} \right) \quad (105)$$

- Uniformidad del acoplador, es decir, la diferencia entre las pérdidas de inserción máxima y mínima sufrida por el sistema.

$$U = IL_{\max} - IL_{\min} \quad (106)$$

AP.4.5 Filtros ópticos

Existen una gran variedad de dispositivos ópticos que pueden trabajar como filtros, y los más importantes se detallan a continuación.

AP.4.5.1 Filtros de interferencia

Los filtros de interferencia se construyen aplicando una serie de delgadas capas de dos materiales con distinto índice de refracción de forma alternativa, sobre un sustrato de cristal. Estos materiales suelen ser todos dieléctricos, por lo que también se les conoce como filtros dieléctricos [38].

La diferencia en el índice de refracción entre dos capas consecutivas provoca la reflexión. Este fenómeno es el mismo que la reflexión de Fresnel que sucede en los conectores con un hueco de aire en la fibra [39].

Este dispositivo sólo permite el paso de un rango estrecho de longitudes de onda, las cuales están determinadas por las propiedades del material, y el resto son reflejadas. Las longitudes de onda transmitidas vienen determinadas por la siguiente expresión matemática [36]:

$$N\lambda = 2nD \cos \theta \quad (109)$$

donde N es un entero, n es el índice de refracción de la capa, D es el grosor de la capa y θ es el ángulo de incidencia de la luz con respecto a la normal del plano. Sólo aquellas longitudes de onda cuyo período coincida con la longitud de las dos capas de distinto índice de refracción, serán transmitidas a través del filtro.

A continuación se muestra una imagen genérica del funcionamiento de este tipo de filtros ópticos [36]:

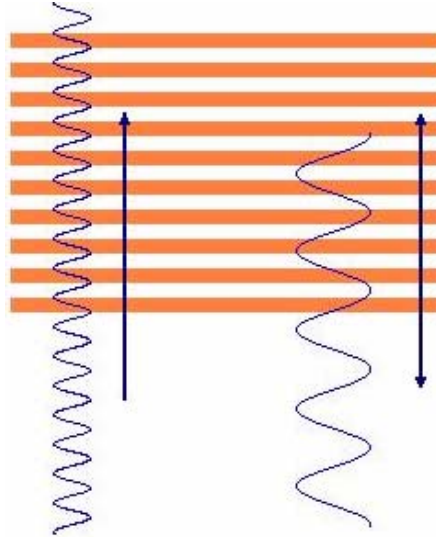


Figura 205: Filtro de interferencia

Al transmitir tan sólo un rango estrecho de longitudes de onda, permite a los filtros de interferencia ser muy importantes en el diseño de demultiplexores ópticos.

AP.4.5.2 Filtros de Fabry-Perot

Este dispositivo se basa en el resonador de Fabry-Perot o FP. Un resonador FP consiste en una cavidad de índice de refracción n , con dos espejos paralelos altamente reflexivos. Cuando una radiación óptica entra en esta cavidad, aquellas longitudes de onda que cumplen una determinada condición se transmite a través de la cavidad FP. Esta condición está determinada por el espesor de la cavidad, D ; el índice de refracción de ésta, n ; y el ángulo de incidencia de la luz θ , a través de la siguiente expresión matemática [36]:

$$N\lambda = 2nD \cos \theta \quad (110)$$

Siendo N un número entero.

AP.4.5.3 Filtros de Mach-Zender

El esquema de un filtro de Mach-Zender está compuesto por dos acopladores de -3 dB y dos tramos de fibra de diferente longitud, uno de $L + \Delta L$ y otro de longitud L . El sustrato utilizado normalmente es silicio y las regiones de las guías de onda son de SiO_2 , el cual posee un elevado índice de refracción [36].

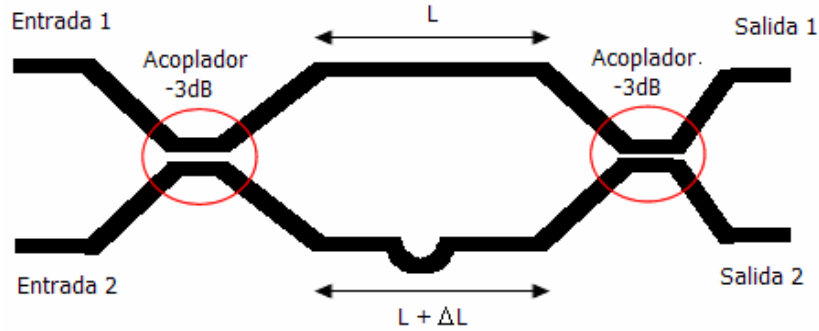


Figura 206: Filtro de Mach-Zender

Para describir el funcionamiento del Mach-Zender, se toma como referencia que opera como un demultiplexor, es decir, utiliza una única entrada, en este caso, Entrada 1. Si se aplica una señal de entrada al filtro en Entrada 1, al llegar ésta al primero acoplador direccional, su potencia se divide por igual entre el brazo de longitud L y el de longitud $L + \Delta L$ [36].

Pero la señal en uno de los brazos experimenta un salto de fase de $\pi/2$ respecto del otro. Concretamente, la señal que se acopla al brazo inferior sufre un cambio de fase de $\pi/2$, mientras que la señal acoplada en el brazo superior (longitud L) no sufre variación alguna.

Tras propagarse a lo largo de los brazos, las señales alcanzan el segundo acoplador direccional. En este punto, la señal que se propaga por el brazo inferior experimenta un desfase adicional de $\beta\Delta L$, debido a la diferencia de longitud entre los dos caminos. Para la Salida 1, la señal procedente del brazo inferior sufre otro retraso de fase de $\pi/2$ respecto a la señal que se transmite por el brazo de arriba, de este modo la diferencia de fase relativa total entre las dos señales en la Salida 1 es de $\pi/2 + \beta\Delta L + \pi/2$ [36].

Sin embargo para la Salida 2, la señal transmitida por el brazo de arriba sufre un cambio de fase tan sólo de $\pi/2$, quedando una diferencia de fase relativa total entre las dos señales (Salida 1 y Salida 2) de $\pi/2 + \beta\Delta L - \pi/2 = \beta\Delta L$ [36].

Si se considera $\beta\Delta L = k\pi$ con k impar, las señales en la Salida 1 se añaden en fase. Así por ejemplo si $k = 3$, la diferencia de fase entre las señales es de $3\pi + \pi = 4\pi$, con lo cual están finalmente en fase. Por otro lado, en la Salida 2 las señales se añaden en oposición de fase, es decir con una diferencia de fase igual a π , cancelándose entre ellas [36].

De todo lo anterior se deduce que, las señales que pasan de la Entrada 1 a la Salida 1 son las que tienen un $\beta\Delta L = k\pi$ siendo k impar, y las señales que pasan de la Entrada 1 a la Salida 2, son las que poseen un $\beta\Delta L = k\pi$ con k par.

AP.4.5.4 Filtros sintonizables óptico-acústicos

El funcionamiento de los filtros sintonizables óptico-acústicos se basan en el cambio de algunas propiedades que experimentan ciertos materiales cuando son atravesados por una onda acústica. Entre los materiales en los que este fenómeno es más significativo se encuentra el novato de litio. En la figura se muestra un esquema de un filtro sintonizable electroacústico [39].

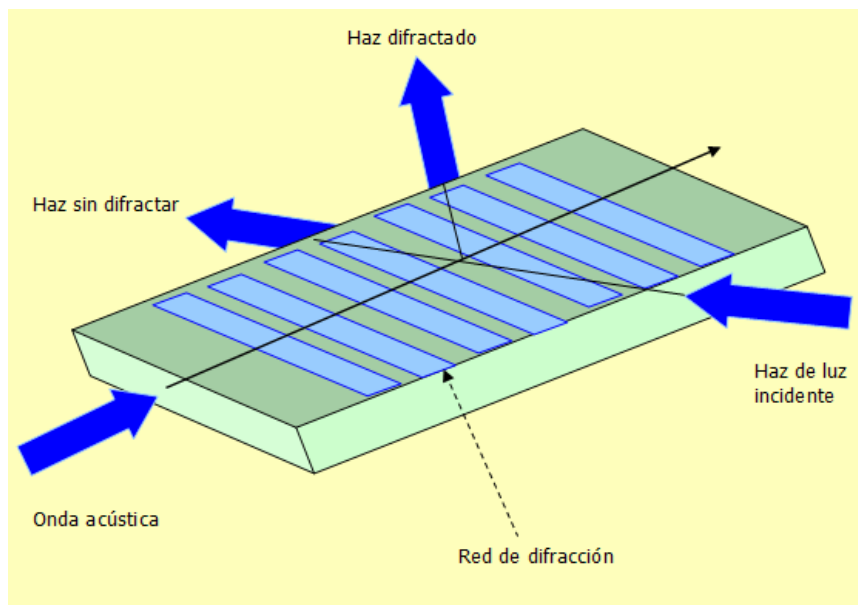


Figura 207: *Filtro acusto-óptico*

Mediante un transductor piezoeléctrico se genera una onda acústica de una frecuencia entorno a 100-200 MHz. Esta onda al propagarse por el filtro crea una red de difracción. Aunque esta onda se propaga a lo largo del material, la señal óptica que atraviesa el filtro la reconoce como si se mantuviera estática. Como la frecuencia de la señal óptica es mucho mayor que la de la onda sonora, la interacción entre ambas se produce en un intervalo de tiempo muy corto. El resultado de esta interacción es que el haz óptico de entrada aparece en la salida dividido en un conjunto de nuevos haces debido al fenómeno de difracción [39].

AP.4.5.5 Filtros acopladores

Los acopladores ópticos, además de las propiedades ya citadas en el apartado 3.7.2.3 *Acopladores Ópticos* del presente documento, pueden separar o dividir diferentes longitudes de onda. La cantidad de luz que pueden transferir entre las fibras

fundidas depende de la longitud de la región de acoplamiento y de las longitudes de onda tal y como se muestra en la siguiente figura. Este efecto se aprovecha para poder separar longitudes de onda distintas [38] [39].

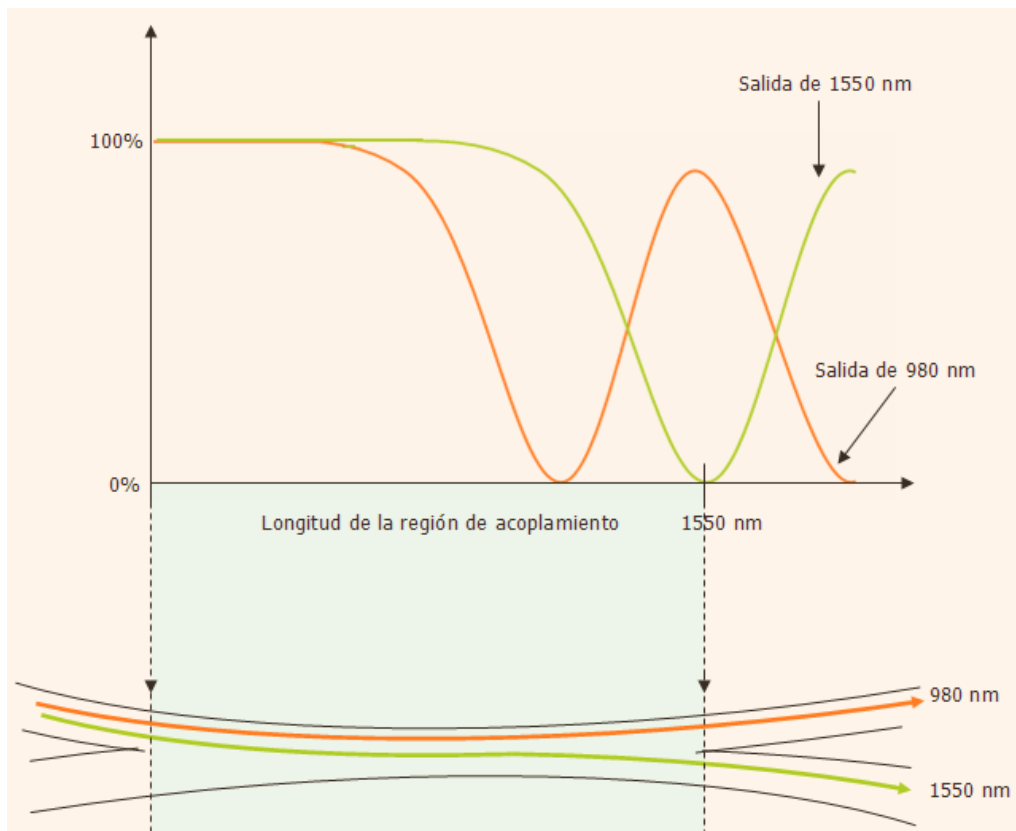


Figura 208: *Filtro acoplador*

La luz incidente entra por la fibra superior y gradualmente se transfiere hacia la fibra inferior, de forma que si la longitud de onda es lo suficientemente larga, toda la luz se transfiere a la fibra inferior. En la figura 208, la longitud de 980 nm se desplaza hacia la fibra inferior antes que la longitud de 1550 nm. Según avanza por la fibra la longitud de 980 nm vuelve a desplazarse a la fibra superior de forma que al final de la fibra, la longitud de 980 nm sale por la fibra superior y la de 1550 nm por la fibra inferior [39].

AP.4.6 Amplificadores ópticos

Los amplificadores ópticos se clasifican en función de dos criterios: según su aplicación final, y por tanto, según el servicio que van a prestar; y según su estructura y funcionamiento interno. A continuación se desarrolla cada uno de los diferentes tipos de amplificadores englobados en ambos criterios de clasificación.

AP.4.6.1 Tipos de amplificadores ópticos según su aplicación

Existen diversos tipos de amplificadores ópticos según su aplicación final. Los amplificadores suelen caracterizarse y diseñarse en función de la aplicación a la que van

destinados y por tanto, su estructura y composición dependen directamente de ello. Los amplificadores ópticos se clasifican en amplificador de línea, preamplificador, y amplificador de potencia, que se detallan a continuación:

- ***Amplificador de línea***

Un amplificador de línea suele utilizarse en enlaces con fibra monomodo, como el que se muestra en la siguiente figura. Su principal función es elevar el nivel de potencia de la señal y compensar así las pérdidas sufridas por la propagación de la señal. Frecuentemente se instalan varios amplificadores en cascada a lo largo de la línea [38].

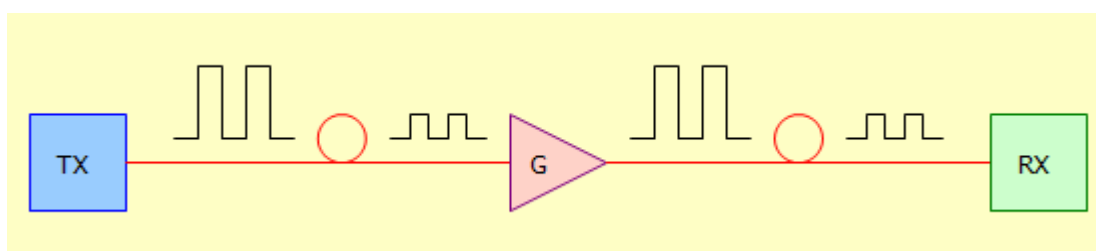


Figura 209: Esquema de un amplificador de línea

- ***Preamplificadores***

Un preamplificador o *front-end* suele instalarse justo antes del receptor, tal y como muestra la figura que viene a continuación. Su misión es amplificar la señal antes de ser detectada por el fotodetector del receptor, para mejorar así la relación señal a ruido [39].

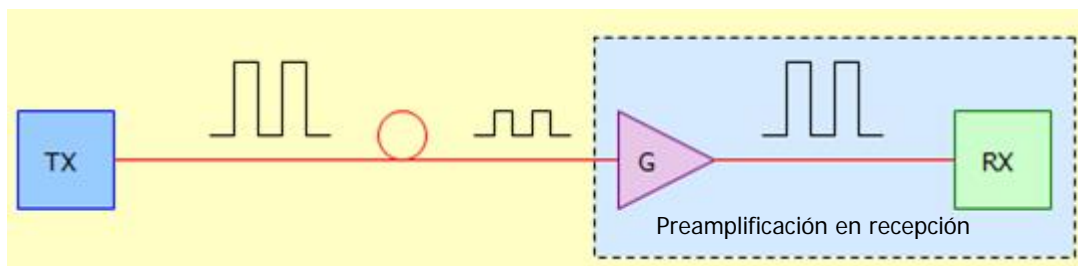


Figura 209: Esquema de un preamplificador

- ***Amplificador de potencia***

Un amplificador de potencia suele instalarse justo a continuación de la fuente láser. Se emplea para elevar el nivel de potencia de la señal e incrementar la distancia de transmisión. En la configuración de la figura 210 su objetivo es compensar las pérdidas

debidas al modulador externo [38]. En ocasiones, también puede colocarse justo antes de un divisor óptico, para compensar las pérdidas que sufre la señal al atravesar dicho acoplador [39], tal y como se puede observar en la figura 211.

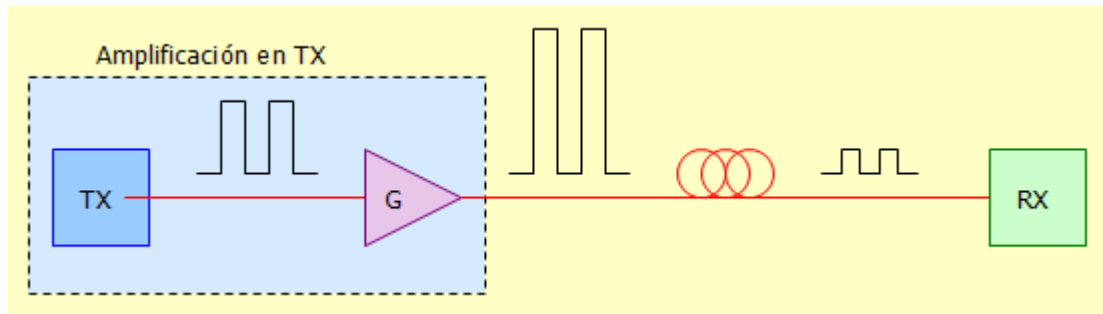


Figura 210: Amplificador de potencia tras el transmisor

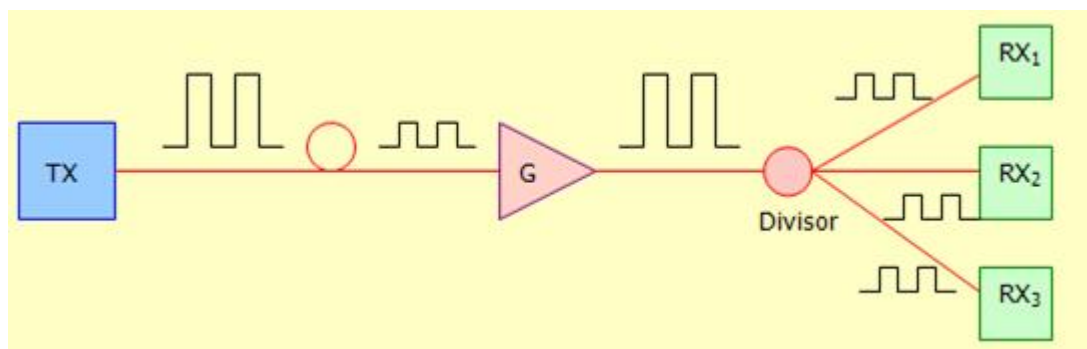


Figura 211: Amplificador de potencia ante divisor

AP.4.6.2 Tipos de amplificadores ópticos según su estructura y funcionamiento

El fundamento de un amplificador óptico es el proceso de emisión estimulada al igual que en un láser. Su estructura es similar a la de un láser salvo que no posee una realimentación para evitar que el dispositivo oscile, de forma que puede elevar el nivel de potencia de la señal pero no generar una señal óptica coherente. En la siguiente figura se muestra un esquema del funcionamiento de un amplificador óptico básico [38].

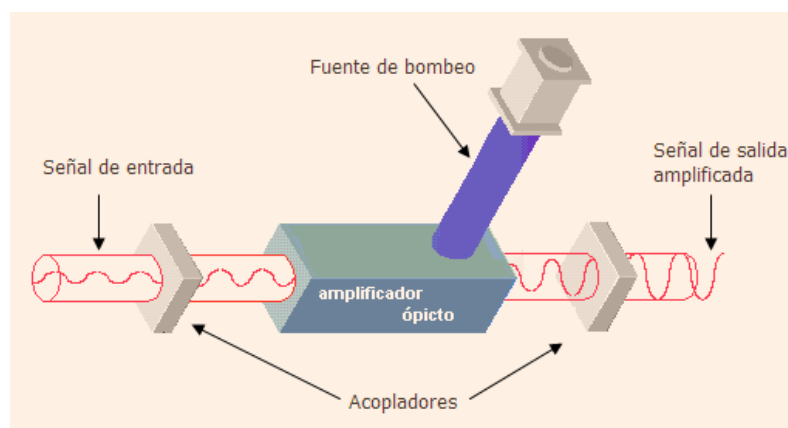


Figura 212: Amplificador óptico básico

Una fuente de bombeo inyecta una energía en la zona activa del amplificador. Esta energía es absorbida por los electrones que incrementan sus niveles de energía produciéndose la inversión de población. Al ser alcanzados estos electrones por los fotones de la señal óptica de entrada caen a unos niveles energéticos más bajos dando lugar a un nuevo fotón. Esto es el proceso de emisión estimulada, produciéndose así la amplificación de la señal. Dicha amplificación, se produce dentro de un rango de frecuencias que dependen del material, así como de su estructura física [38].

Independientemente de la clasificación anterior, existe otra clasificación paralela de los amplificadores ópticos según su estructura compositiva y funcionamiento. Existen por tanto dos tipos de amplificadores: los amplificadores ópticos de semiconductor (SOA) y los amplificadores ópticos de fibra dopada (DFA), que se detallan a continuación.

- ***Amplificador óptico de semiconductor o SOA***

Un amplificador óptico de semiconductor o SOA (*Semiconductor optical amplifier*), es muy similar al de un láser semiconductor pero sin la realimentación que hace que éste oscile. La zona activa de estos amplificadores está construida con aleaciones de elementos semiconductores como el fósforo, el indio, el galio y el arsénico [39].

Según como se evite la oscilación del sistema, se pueden diferenciar tres subtipos de amplificadores [39]:

- **Amplificadores de enganche por inyección.** Son los menos empleados y consisten en láseres de semiconductor polarizados por encima del umbral que se emplea para amplificar una señal óptica de entrada.
- **Amplificador de Fabry-Perot (FP).** Su estructura es básicamente como la de un láser de Fabry-Perot pero polarizado por debajo del umbral impidiendo así su oscilación. Su principal inconveniente es su respuesta en frecuencia, que al igual que un filtro de Fabry-Perot consiste en una serie de bandas de paso espaciadas periódicamente.
- **Amplificador de onda viajera o TWSLA (*Travelling wave SLA*).** En este amplificador se eliminan las reflectividades de los espejos de salida de la cavidad, evitando así la realimentación de la señal, por lo que la amplificación se produce por el paso de la señal una sola vez por el dispositivo. Este amplificador se suele alargar con respecto a los diodos láseres convencionales para aumentar la ganancia.

El amplificador de onda viajera es el tipo de SOA más empleado en la actualidad debido a sus prestaciones en saturación, ancho de banda y ruido. Su estructura consiste

en una unión p-n polarizada en directa con los extremos de la zona activa recubiertos con un material antirreflectante, como se muestra en la siguiente figura [38].

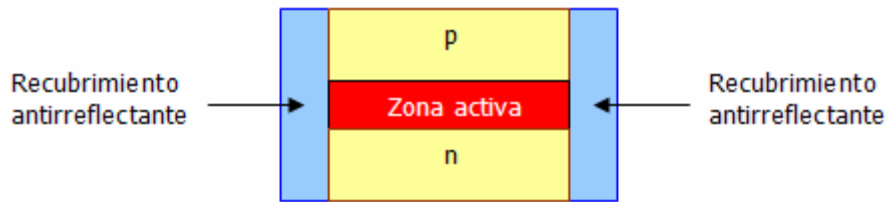


Figura 213: Estructura de un SOA de onda viajera

Las principales ventajas de un amplificador SOA cualquiera, son las siguientes [38]:

- La posibilidad de integración por su reducido tamaño.
- La facilidad de construcción a distintas longitudes de onda variando la composición del material.

Por otro lado, sus principales inconvenientes son los que se enumeran a continuación [39]:

- Su geometría rectangular produce pérdidas al acoplarlo con la fibra, y no amplifica por igual las dos polarizaciones de la señal transmitida.
- Cuando las señales transmitidas poseen ciertos niveles de potencia aparecen fenómenos de naturaleza no lineal que producen distorsión y diafonías. Por ejemplo, debido a la saturación de la ganancia la señal de un canal puede modular la ganancia instantánea del amplificador de forma que la información de esta señal pase a las señales del resto de canales. Esto es lo que se conoce como modulación cruzada de ganancia o XGM (*Cross gain modulation*). Otro efecto similar al anterior que puede producirse en la fase es la modulación cruzada de fase o XPM (*Cross phase modulation*).

Los efectos debidos a los fenómenos no lineales son muy útiles para implementar, a partir de los amplificadores ópticos, convertidores de longitud de onda. Se aprovechan estos fenómenos para pasar la información de una señal en una longitud de onda a otra con distinta longitud de onda.

Por último, las características técnicas de los amplificadores SOA son las que se muestran a continuación [39]:

Parámetro	Unidad	Dato
Figura de ruido	dB	5 – 6
Ganancia	dB	10 – 20
Potencia de salida	dBm	10

Figura 214: Características técnicas de los amplificadores SOA

▪ **Amplificador óptico fibra dopada o DFA**

Un amplificador óptico de fibra dopada o DFA (*doped fiber amplifier*), consiste en un núcleo de fibra dopada con iones de tierras raras, tales como el erbio (Er), el praseodimio (Pr), el iterbio (Yb) o el neodimio (Nd). El más común es el EDFA o amplificador óptica de fibra dopada con erbio (*Erbium doped fiber amplifier*), cuyas características fundamentales se detallan a continuación [39].

▪ **Amplificador de fibra dopada con erbio o EDFA**

El EDFA es el amplificador de fibra dopada más empleado en la actualidad, ya que es posible amplificar señales en la tercera ventana operativa (1550 nm). El motivo puede deducirse del diagrama de niveles de erbio que se muestra a continuación [39].

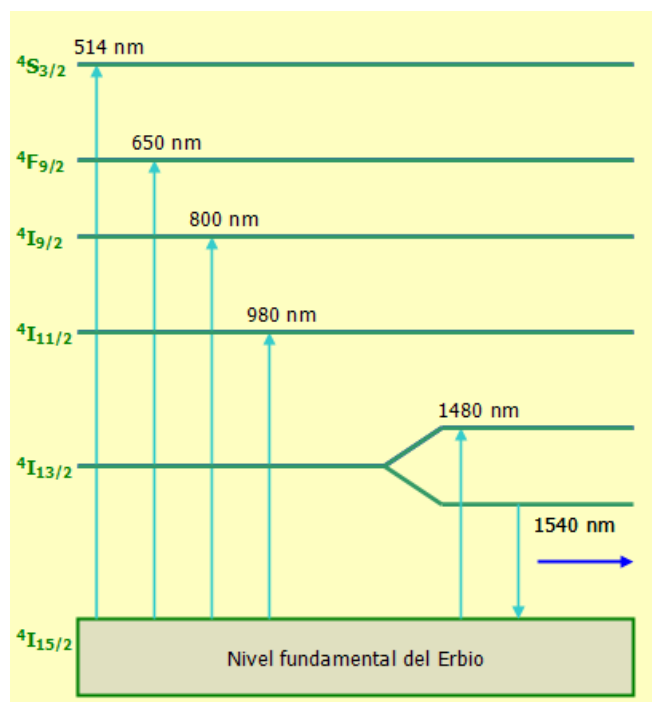


Figura 215: Niveles energéticos del erbio

Se puede observar en el diagrama de niveles del erbio de energía de la figura 215, que la transición entre los niveles $4I_{13/2}$ y $4I_{15/2}$ corresponde a una longitud de onda comprendida entre los 1530 y 1560 nm aproximadamente. Luego al provocar una inversión de población entre dichos niveles se puede amplificar señales en la tercera

ventana. El primer nivel excitado es el $^4I_{13/2}$, desde el que las frecuencias de transición se corresponden con la tercera ventana, tiene un tiempo de vida medio de unos 10 ms, mientras que en los dos superiores es de 0.001 ms, por lo que el nivel $^4I_{13/2}$ es un estado metaestable. Por lo tanto todo ión que llegue a estos niveles por medio del bombeo acabará cayendo al nivel $^4I_{13/2}$ por emisión espontánea, y a su vez caerá al nivel fundamental por emisión estimulada, produciéndose así la amplificación [38] [39].

Al dopar con iones de erbio el núcleo de una fibra óptica se provoca un ensanchamiento de las bandas de transición. Esto a su vez provoca un ensanchamiento considerable del rango de longitudes de onda que se pueden amplificar. Este efecto puede mejorarse añadiendo al núcleo, aluminio y óxido de germanio.

Las dos longitudes de onda de bombeo más adecuadas son 1480 nm (mediante un diodo láser de InGaAsP) y 980 nm (mediante un diodo láser de InGaAs). El empleo de una u otra longitud de onda depende de ciertas características del proceso de absorción en cada uno de estos niveles, derivadas de los diferentes tipos de ruido que pueden originarse, de la disponibilidad de las fuentes de bombeo o de la saturación de la ganancia [39].

El bombeo a 1480 nm supone un amplificador más ruidoso pero más inmune a la saturación de ganancia. Mientras que el bombeo a 980 nm proporciona un amplificador con prestaciones de ruido excelentes pero es más proclive a la saturación de ganancia. En ambos casos es posible obtener ganancias entre 30 y 50 dB [39].

Los elementos básicos para implementar un EDFA son [38]:

- El medio activo donde se produce la inversión de población. Formado por un tramo de fibra óptica de SiO₂ con el núcleo dopado con iones de erbio.
- La fuente de bombeo óptico a 1480 o 980 nm, formada por un láser semiconductor.

En cuanto a la ganancia, cabe destacar que en un EDFA ésta no es uniforme con la longitud de onda. Debido a la saturación según crece la potencia de entrada la ganancia disminuye hasta llegar a un punto en que se mantiene constante. El máximo de ganancia se alcanza alrededor de los 1530 nm. Como puede observarse en la figura 216, a potencias altas la respuesta de la ganancia en todo el rango de la banda C (1530-1565 nm) es bastante plano, lo cual no sucede a potencia de entradas más bajas. Esto es un grave inconveniente en los sistemas WDM, ya que no todos los canales se amplifican por igual [39].

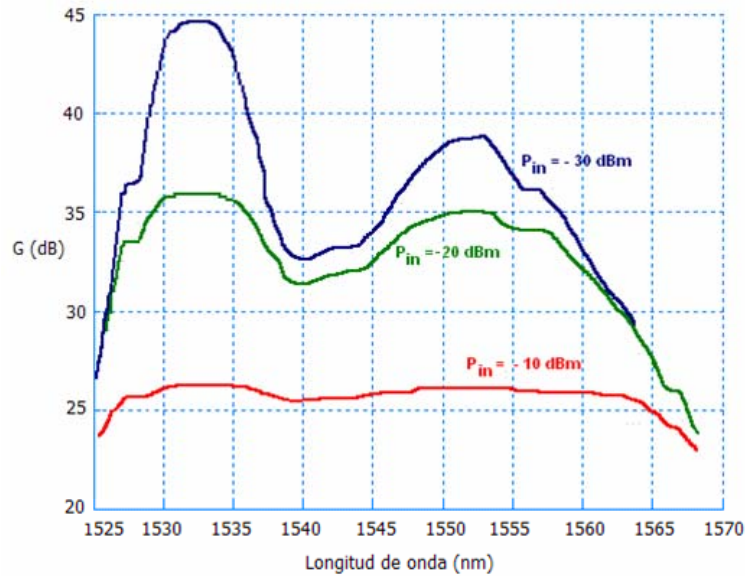


Figura 216: *Ganancia de un EDFA*

Las características técnicas que hacen del EDFA el amplificador más utilizado son las siguientes [39]:

- Como consecuencia de su geometría cilíndrica sus pérdidas de inserción en las uniones con la fibra óptica son muy reducidas.
- Debido también a su geometría su ganancia es poco sensible a la polarización de la señal.
- El ruido que genera es bajo.
- La saturación de la ganancia no ocasiona distorsión.

Por otro lado, sus principales inconvenientes son los que se enumeran a continuación [39]:

- Sólo opera en la tercera ventana, aunque existen dispositivos similares pero dopados con otros elementos que pueden operar en otras ventanas.
- Su ganancia no es uniforme para todas las longitudes de onda, aunque esto suele solventarse trabajando cerca de su saturación, pues la curva de ganancia es más plana.

A continuación se muestra una tabla resumen con los parámetros típicos de un amplificador EDFA [39].

Parámetro	Unidad	1480 nm	980 nm
Figura de ruido	dB	5 .5	3 – 4.5
Ganancia	dB	40	50
Potencia de salida	dBm	20	5
Eficiencia de bombeo	dB/mW	5	10
Potencia de bombeo	mW	50 – 200	10 - 20

Figura 217: *Parámetros típicos de un amplificador EDFA*

- **Amplificador de fibra dopada con Praseodimio o PDFA**

El fundamento de este tipo de amplificador es el mismo que el de los EDFA. La única diferencia es que se emplea Praseodimio para dopar el núcleo de la fibra óptica, lo que permite a este dispositivo amplificar en la segunda ventana. La principal desventaja es que la ganancia es menor que con un EDFA [38].

- **Amplificador de Raman**

Este tipo de amplificador se basa en el efecto Raman o SRS. Esta no linealidad de las fibras ópticas tiene lugar cuando ésta es atravesada por una radiación monocromática de alta intensidad. Bajo ciertas condiciones, la radiación interactúa con el material dando como resultado la aparición de una nueva longitud de onda, de mayor intensidad que la inicial [38].

El efecto Raman estimulado es similar a una emisión estimulada, fenómeno en el cual se basan los amplificadores de fibra dopada. En la emisión estimulada, el fotón que interactúa con el medio provocando la emisión estimulada de otro fotón sigue presente. En el caso del Raman estimulado, después de la interacción entre el fotón y el medio, se genera un nuevo fotón de menor energía (menor frecuencia) y la diferencia de energía se transfiere al material dando lugar a vibraciones moleculares, desapareciendo el fotón inicial [39].

Las frecuencias que se pueden generar dependen las frecuencias características de las moléculas que componen el material. Si al tiempo que pasa por la fibra óptica la señal de bombeo pasa otra señal con una frecuencia característica del material, esta frecuencia será estimulada. En el caso de un material amorfo, como es una fibra óptica, las frecuencias características del material son un todo casi continuo, es decir, no son un conjunto de frecuencias claramente diferenciadas como ocurre con los materiales monocristalinos [39].

Gracias a este concepto se obtiene un nuevo método de amplificar una señal óptica. La señal que provoca la amplificación será la propia señal que transmite la información. Además, si por la fibra se transmite más de un canal, cada uno dará lugar al efecto Raman en su propia frecuencia, produciéndose la amplificación, siempre que estas frecuencias estén dentro del rango de frecuencias características del material.

Los principales inconvenientes que presentan estos amplificadores es la necesidad de una alta potencia de bombeo, cercana al vatio. Por el contrario una de sus ventajas es

que cubre un margen de longitudes de onda no cubierto por los EDFA, por lo que pueden emplearse de forma complementaria. [38]

AP.4.7 Conversores ópticos de longitud de onda

Existen diferentes conversores ópticos de longitud de onda que permiten cambiar la longitud de onda de transmisión de la señal, sin necesidad de cambiar la misma al dominio eléctrico. Los métodos más utilizados son los que se desarrollan a continuación.

AP.4.7.1 Conversor de longitud de onda basado en XGM

Estos métodos se basan en el amplificador óptico semiconductor, SOA. En el proceso de conversión de longitud de onda se fundamenta en el proceso de ganancia cruzada XGM. Para ello se inyecta en el SOA la señal con la información (con longitud de onda λ_1) junto con una señal continua, y de menor amplitud, cuya longitud de onda es a la que se quiere convertir, λ_2 . Cuando la señal en λ_1 se tiene un 1 en el SOA se satura y no amplifica la señal en λ_2 ; en cambio cuando en la señal en λ_1 se tiene un 0, el SOA amplifica la señal en λ_2 [39].

Mediante un filtrado en λ_2 se tiene una señal en dicha longitud de onda que es la réplica invertida de la señal en λ_1 . Los principales inconvenientes de esta estructura son el *chirping* que siempre ocurre en los SOA, el contraste entre las señales de 1 y del 0 y el ruido derivado de la emisión espontánea [39].

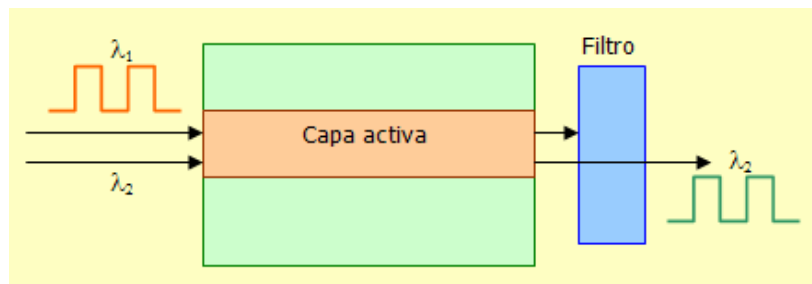


Figura 218: *Conversor de longitud de onda SOA-XGM*

AP.4.7.2 Conversor de longitud de onda basado en filtros y SOA

Como solución al contraste de los conversores anteriores, se emplea la configuración basada en un filtro con un SOA en cada brazo, tal y como se muestra en la siguiente figura. Esta configuración se basa, además del efecto XGM, en el fenómeno de la modulación cruzada de fase o CPM.

La señal en λ_1 con la información y la señal de bombeo en λ_2 entran cada una por un brazo del filtro. La señal en λ_1 se divide de forma que la mayor parte de su intensidad se dirige a unos de los brazos. En cambio la señal en λ_2 se divide por igual [39].

Cuando en λ_1 se transmite un 0 la señal de bombeo sale por la rama contrario por la que entró. Cuando se transmite un 1, la intensidad de la señal en λ_1 modifica el índice de refracción de la rama por donde circula la mayor por parte de la potencia de ésta, provocando un desplazamiento de π en la fase de la señal λ_2 , debido a la CPM, por lo que ambas señales salen por el puerto correspondiente a la misma rama por la que entraron. Mediante un filtro se obtiene una señal en λ_2 que es réplica de la señal en λ_1 [39].

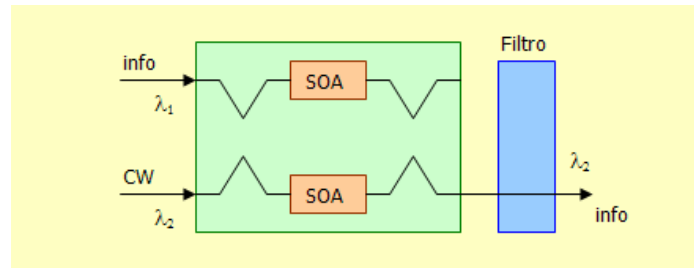


Figura 219: *Conversor de longitud de onda SOA y filtros*

AP.4.7.3 Conversor de longitud de onda basado en FWM

Esta configuración se basa en el fenómeno de mezclado de cuarta de onda o FWM (*Four wave mixing*), que se produce en un SOA y que es la principal causa de la diafonía en estos amplificadores. En este caso se inyectan las señales con la información en λ_1 y la señal de bombeo en λ_p . Como resultado de este efecto la señal tendrá una frecuencia λ_2 de tal forma que [39]:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (116)$$

A continuación se muestra en la figura 220 el esquema en el que la señal de salida es análoga a la entrada pero con diferente longitud de onda [39].

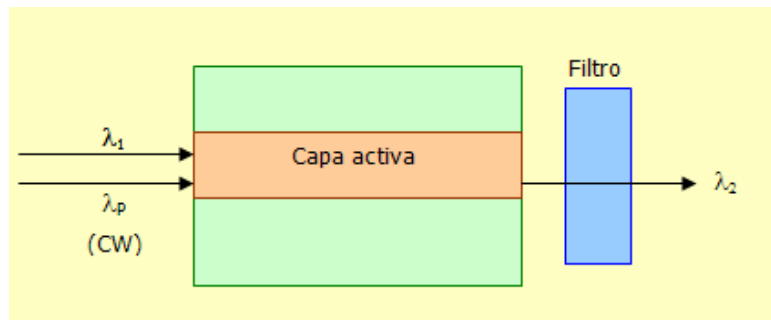
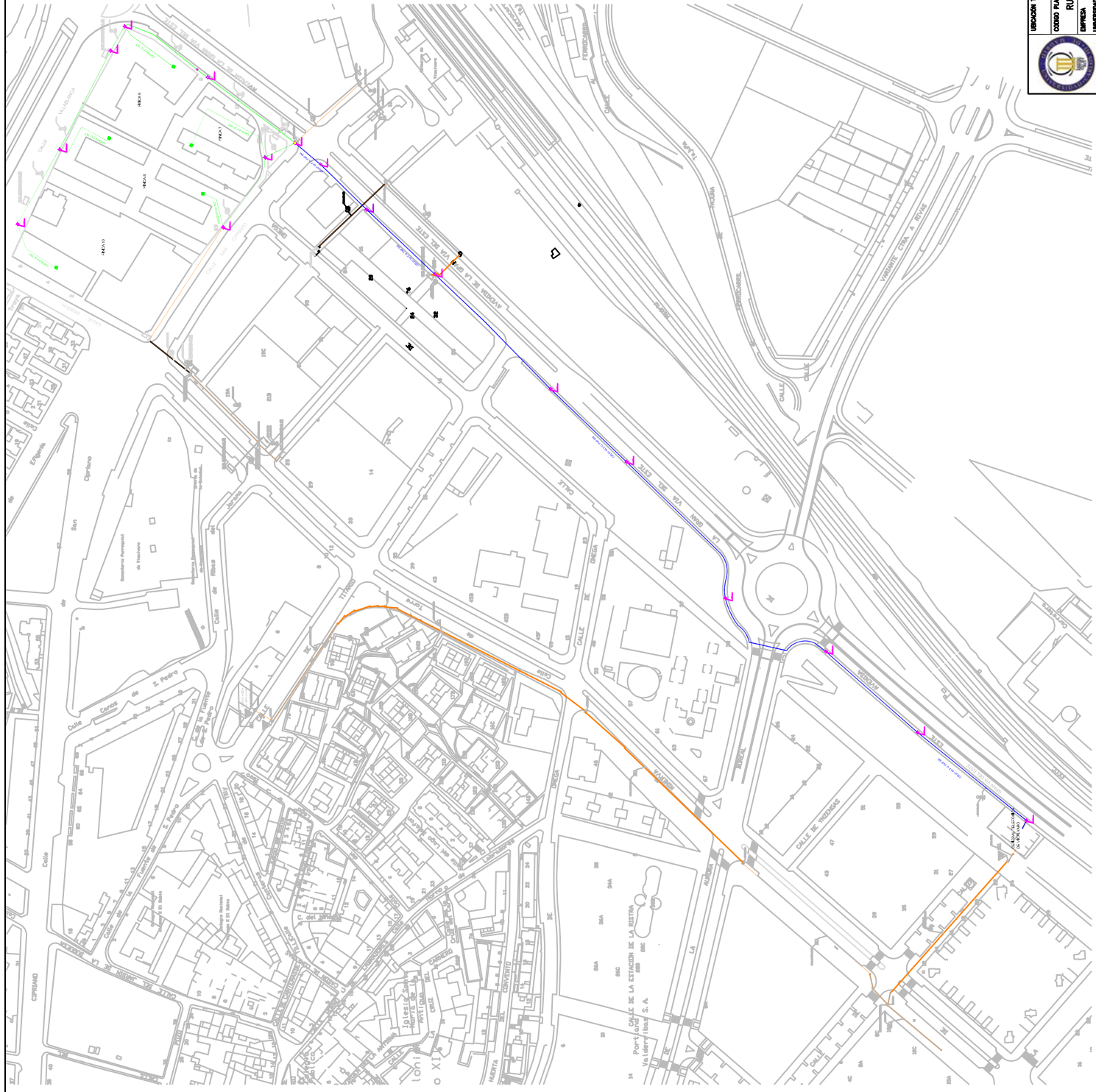


Figura 220: *Conversor de longitud de onda FWM*

Anexo I

Planos del proyecto

El presente anexo muestra algunos ejemplos de delineación del proyecto de diseño y despliegue de la red FTTH. Dado que las fincas son muy similares y puesto que no se cuenta con los proyectos de ejecución de cada edificio en particular, no se considera necesario aportar los planos de todas las fincas, sino tan sólo los referentes a una de ellas (junto a los planos generales).



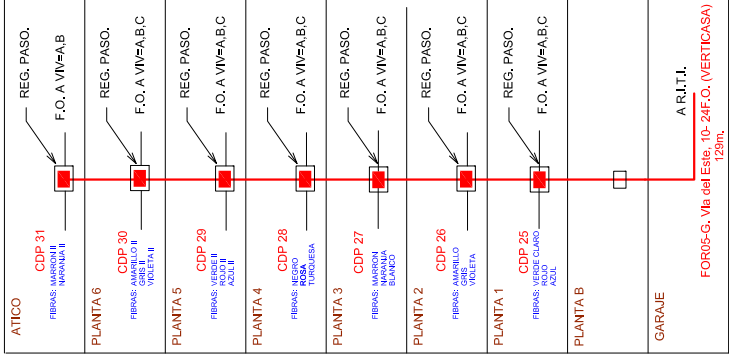
SIMBOLOGÍA

- | | |
|---|-----------------------------------|
|  | CABLE DE RED URBANA (TRONCAL) |
|  | CABLE DE RED DE ACCESO |
|  | CANALIZACIÓN DISPONIBLE |
|  | ARQUETA DE ACCESO A CANALIZACIÓN |
|  | CAJA TERMINAL ÓPTICA DEL R.I.T.I. |

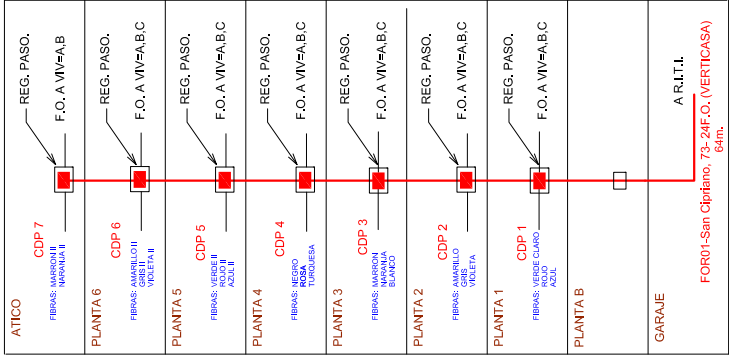
	UBICACIÓN TÉCNICA		VICALVARO (MADRID)	Fecha Proyecto: 15/01/22 Aprobado:  Proyecto: JESUS SUAREZ GONZALEZ	Escala/Plat.
	CODIGO PLANO	TITULO DISEÑO E INSTALACIÓN DE UNA RED FTTH RU01RED1 RED URBANA			
EMPRESA		UNIVERSIDAD CALLES 8 DE MADRID			

FINCA 7- VERTICALES DE DISTRIBUCION
C/ SAN CIPRIANO 73-77- C/ GRAN VIA DEL ESTE 10-12

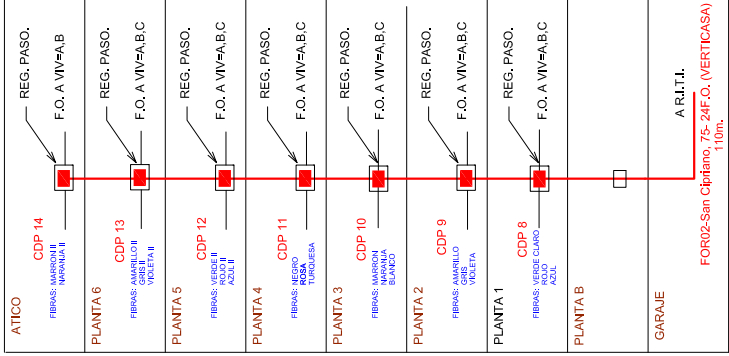
GRAN VIA DEL ESTE N.10



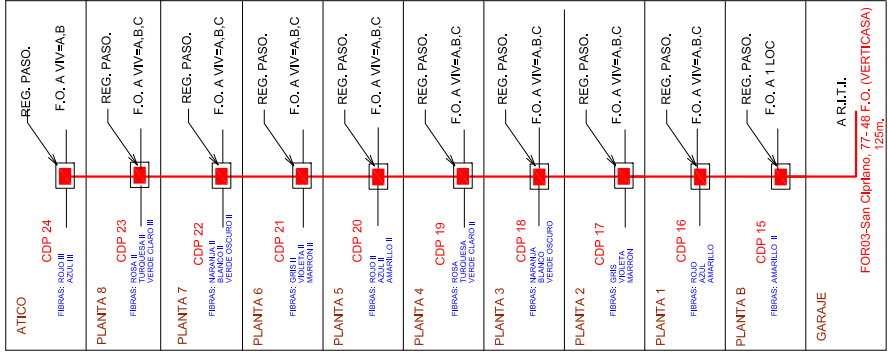
SAN CIPRIANO N.73



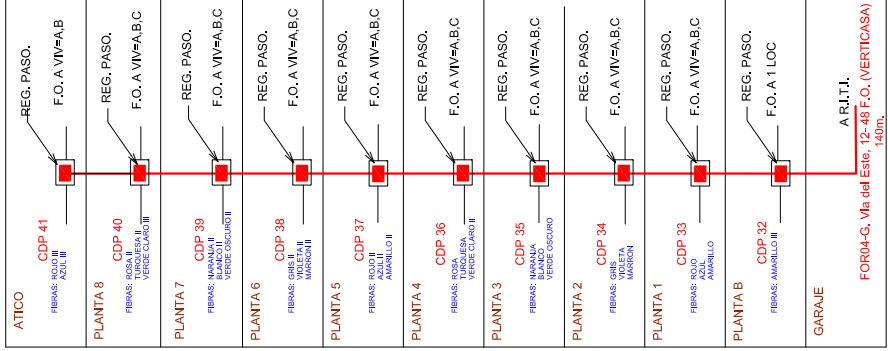
SAN CIPRIANO N.75



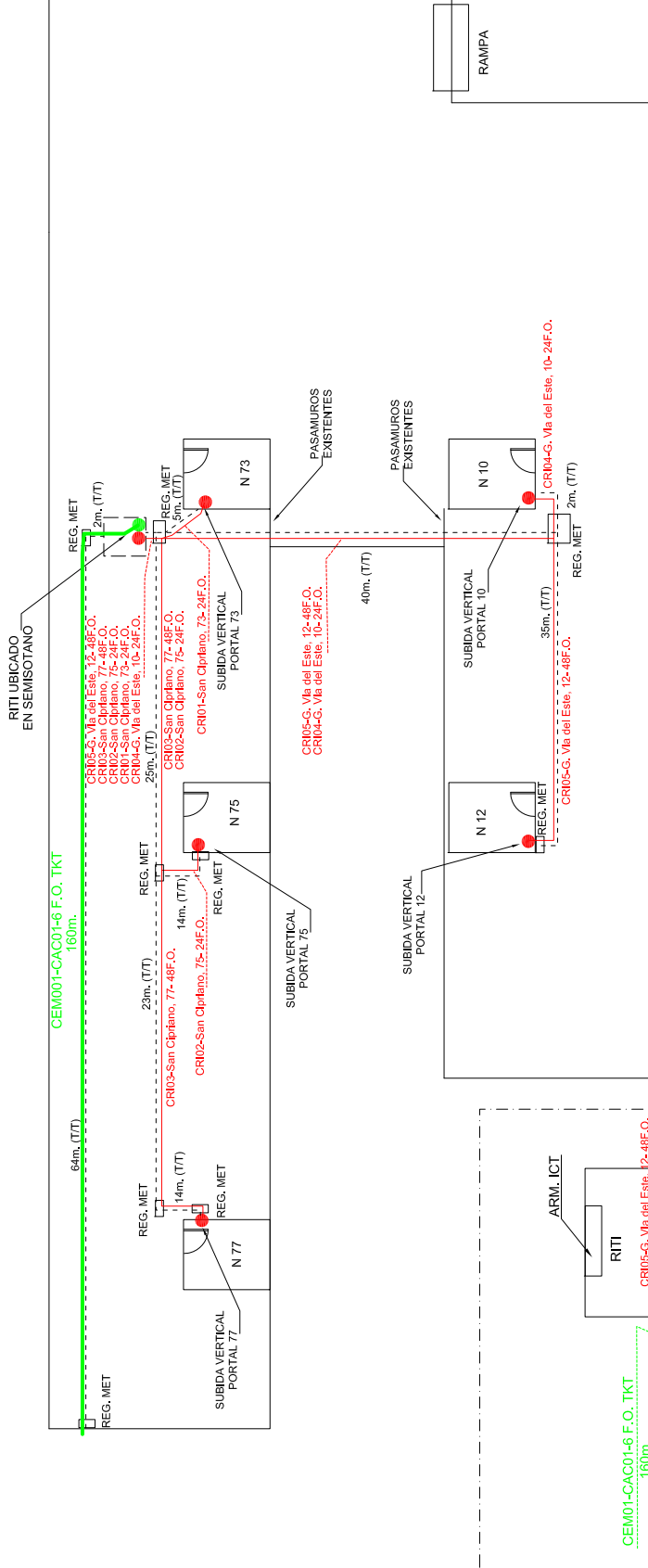
SAN CIPRIANO N.77



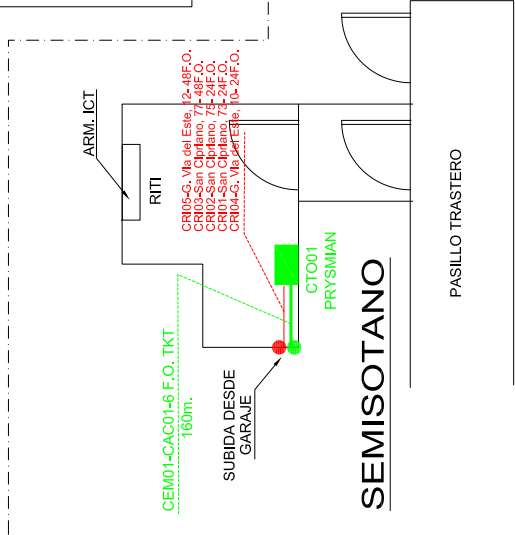
GRAN VIA DEL ESTE N.12



FINCA 7 - CABLEADO INTERIOR
C/ SAN CIPRIANO 73-77 C/ GRAN VIA DEL ESTE 10-12



PLANTA GARAJE



SIMBOLOGIA

- (B/T) INFRAESTRUCTURA EXISTENTE TELECOM. POR BANDEJA
- (T/T) INFRAESTRUCTURA EXISTENTE TELECOM. POR TUBOS
- (B/E) INFRAESTRUCTURA EXISTENTE ELECTRICA POR BANDEJA
- (T/E) INFRAESTRUCTURA EXISTENTE ELECTRICA POR TUBOS
- CABLE TKT 6 F.O.
- CABLE RANSER (VERTICAL)
- CAJA DE DERIVACION PRYSMIAN
- CAJA TERMINAL OPTICA PRYSMIAN

	UBICACIÓN TÉCNICA	FINCA 7 VICÁLVARO (MADRID)	Fecha Proyecto	xx.yy.zz	Escala/Ref.	Explotado
	CODIGO PLANO	F07PL01	Proyectado			
TÍTULO			DISEÑO E INSTALACIÓN DE UNA RED FTTH			
EMPRESA			PLANTA GARAJE			
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID			JESÚS GILBERTO GONZÁLEZ			
			MARCELO LÓPEZ TEA			

Anexo II

Reportaje fotográfico

El presente anexo muestra un reportaje fotográfico del proyecto de instalación en campo de la red FTTH. El hecho de que el resultado de instalación en todas las fincas es exactamente igual sin existir diferencias entre unas y otras, tan sólo se presentan las fotografías referentes a una de las fincas (junto a las fotos generales).

A2.1 Vistas generales de la zona de despliegue



Foto 1: Vista general de la red desplegada

— Central acceso — Red troncal urbana — Fincas de despliegue

A2.2 Central de acceso



Foto 2: Vista aérea de la central de acceso



Foto 3: Vista lateral Este de la central de acceso



Foto 4: Vista lateral Norte de la central de acceso



Foto 5: Vista lateral Sur de la central de acceso

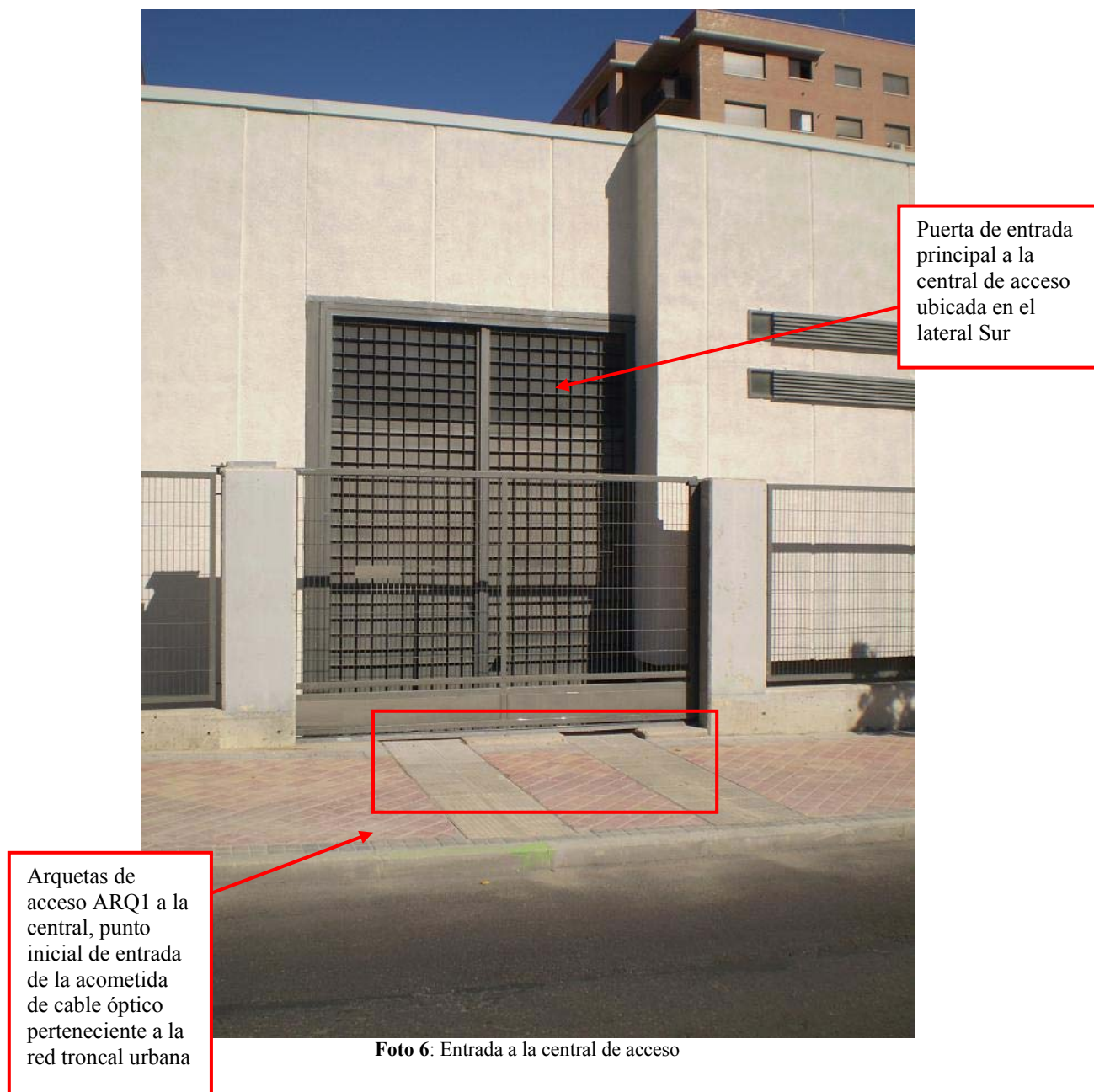




Foto 7: Vista interior de la entrada de la central de acceso



Foto 8: Vista exterior de la puerta de acceso al cuarto técnico de comunicaciones



Foto 9: Vista interior de la puerta de acceso al cuarto técnico de comunicaciones



Equipo de climatización encargado de la refrigeración correcta de la sala a temperatura de 21°C, para el equipamiento activo

Foto 10: Vista del lateral izquierdo del cuarto técnico de comunicaciones



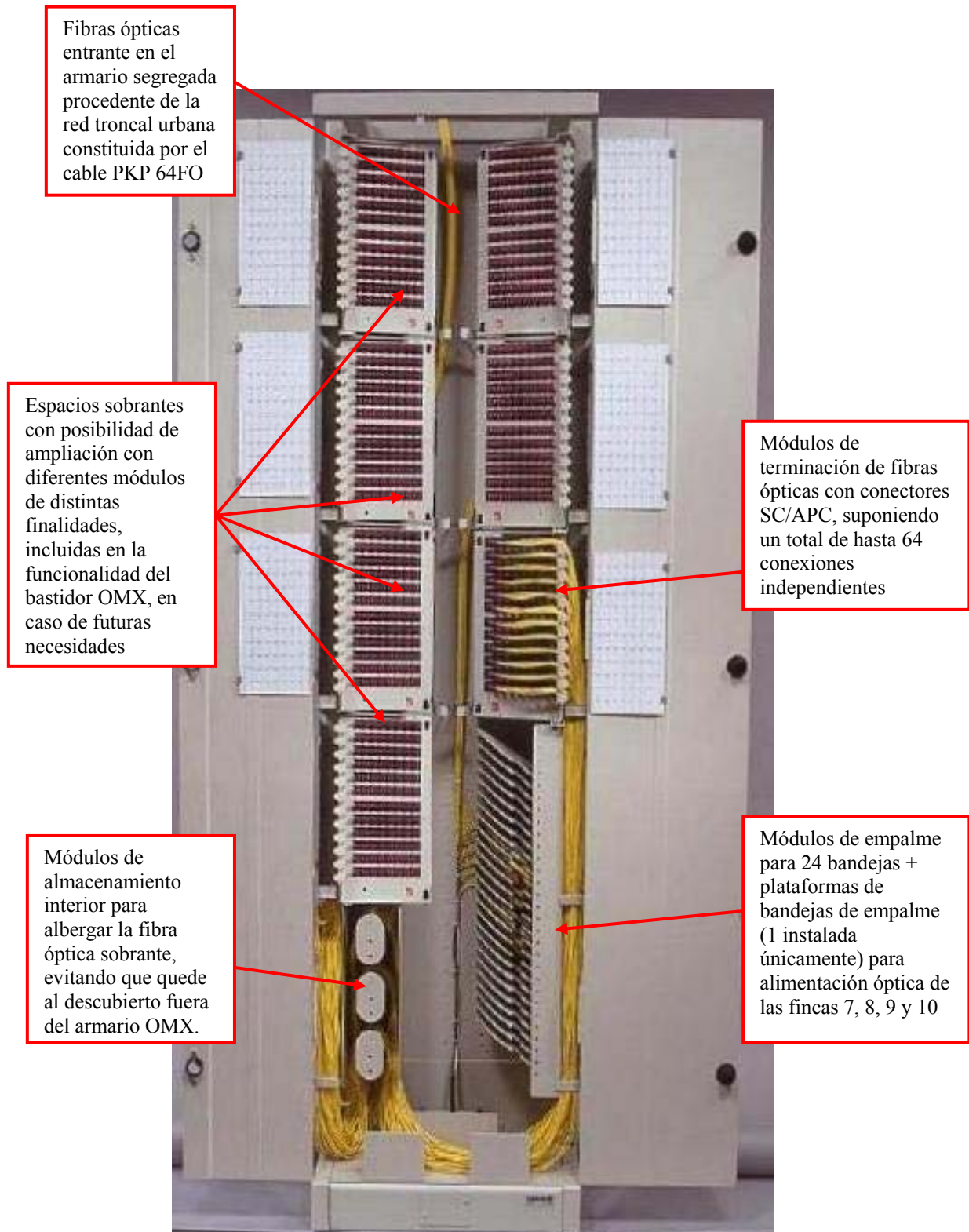


Foto 13: Vista interior del armario bastidor OMX ADC-Krone



Foto 14: Vista frontal izquierda de la sala técnica de comunicaciones, para futuras ampliaciones

A2.3 Red de acceso



Foto 15: Vista exterior de la arqueta ARQ10 punto de confluencia entre red urbana y red de acceso



Foto 16: Vista exterior de la arqueta ARQ10 punto de confluencia entre red urbana y red de acceso



Foto 17: Vista interior de la arqueta ARQ10 punto de confluencia entre red urbana y red de acceso



Foto 18: Vista interior de la arqueta ARQ10 punto de confluencia entre red urbana y red de acceso



Entrada del cable de red troncal urbana 64FO PKP monomodo al interior de la arqueta ARQ10, para la segregación de las fibras correspondientes en la caja de empalme Tyco

Foto 19: Vista interior de la arqueta ARQ10 punto de confluencia entre red urbana y red de acceso



Entrada del cable de red de acceso 6FO TKT monomodo en dirección a la finca 7, con obturación incluida evitando movimientos del cable.

Foto 20: Vista interior de la arqueta ARQ10

A2.3 Finca 7



Foto 21: Vista general de edificios orientación Sur, Av. Gran Vía del Este



Foto 22: Vista general de edificios orientación Oeste, C/ San Cipriano c/v Gran Vía del Este



Foto 23: Vista general de edificios orientación Suroeste, C/ San Cipriano



Foto 24: Vista general de edificios orientación Oeste, Av. Gran Vía del Este



Foto 25: Vista general de orientación Oeste, C/ San Cipriano c/v Gran Vía del Este



Foto 26: Vista de la puerta de entrada al R.I.T.I. de la Finca 7



Foto 27: Vista general de la caja de distribución MDU Prysmian en R.I.T.I.

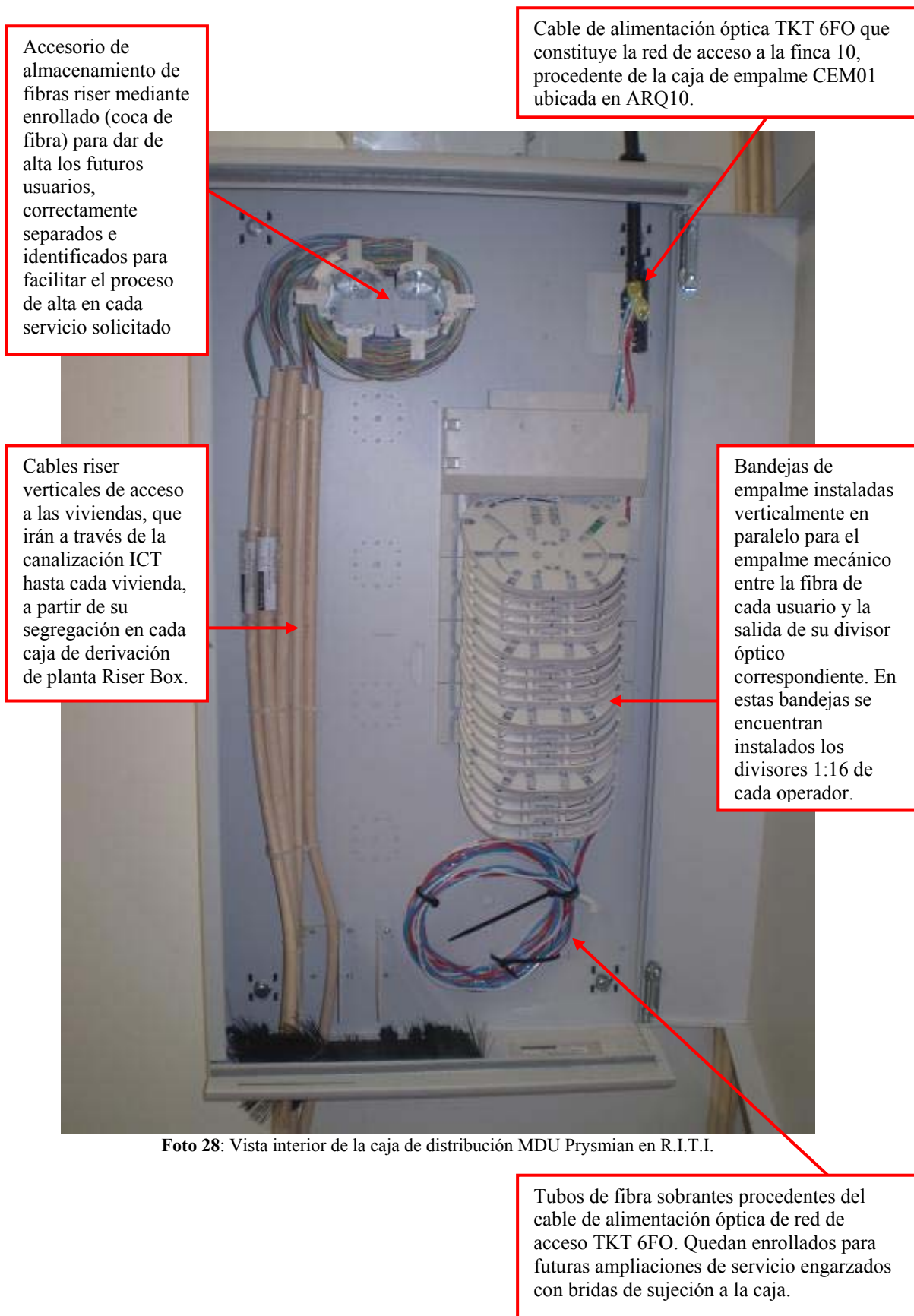
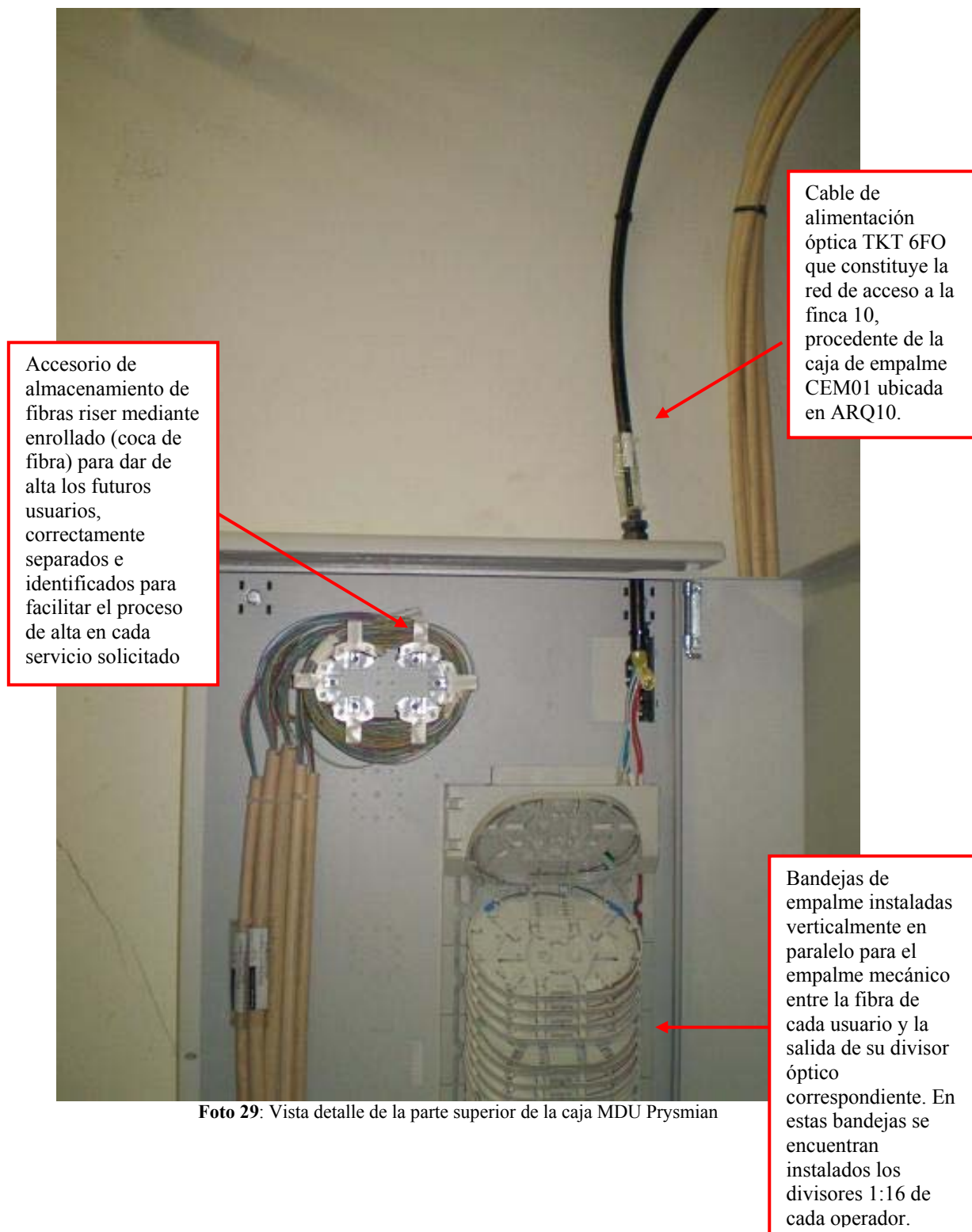


Foto 28: Vista interior de la caja de distribución MDU Prysmian en R.I.T.I.



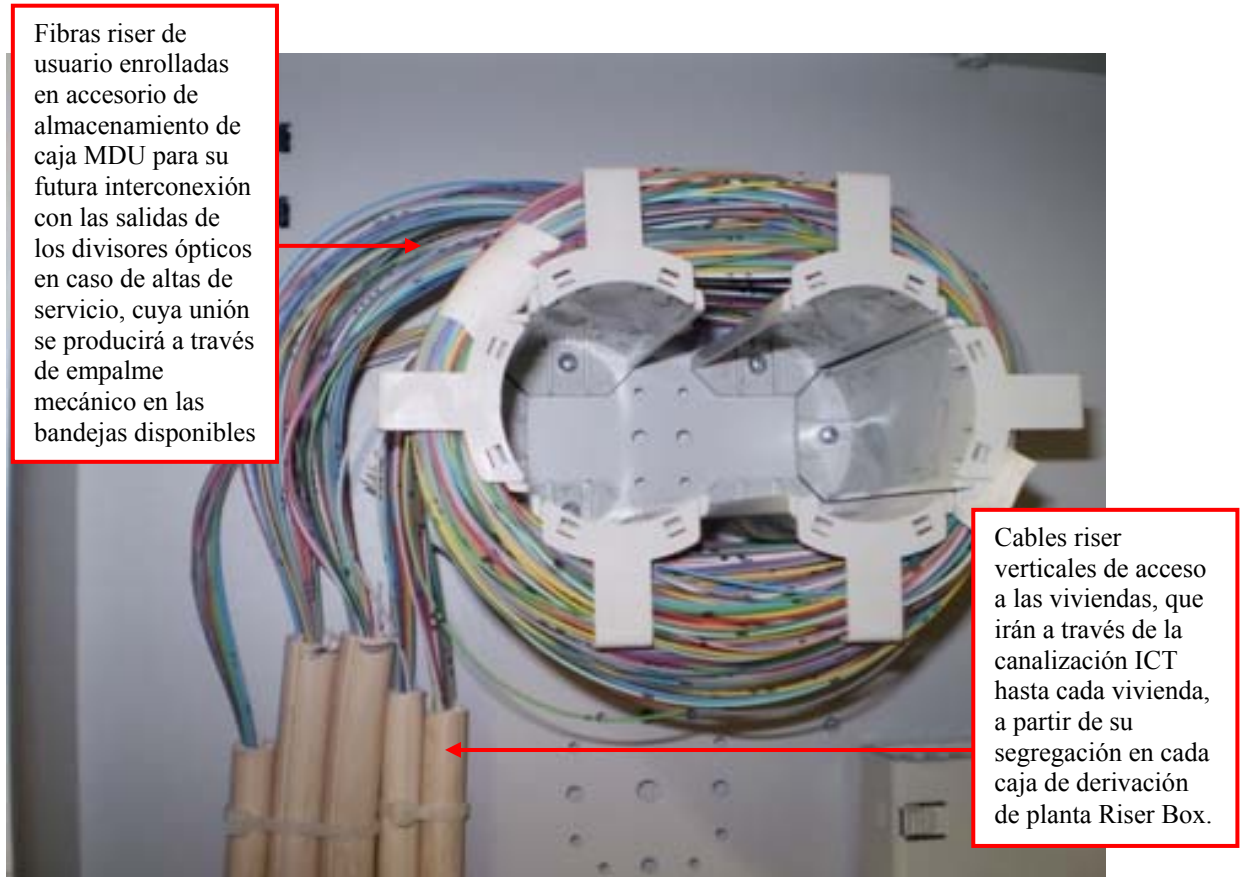
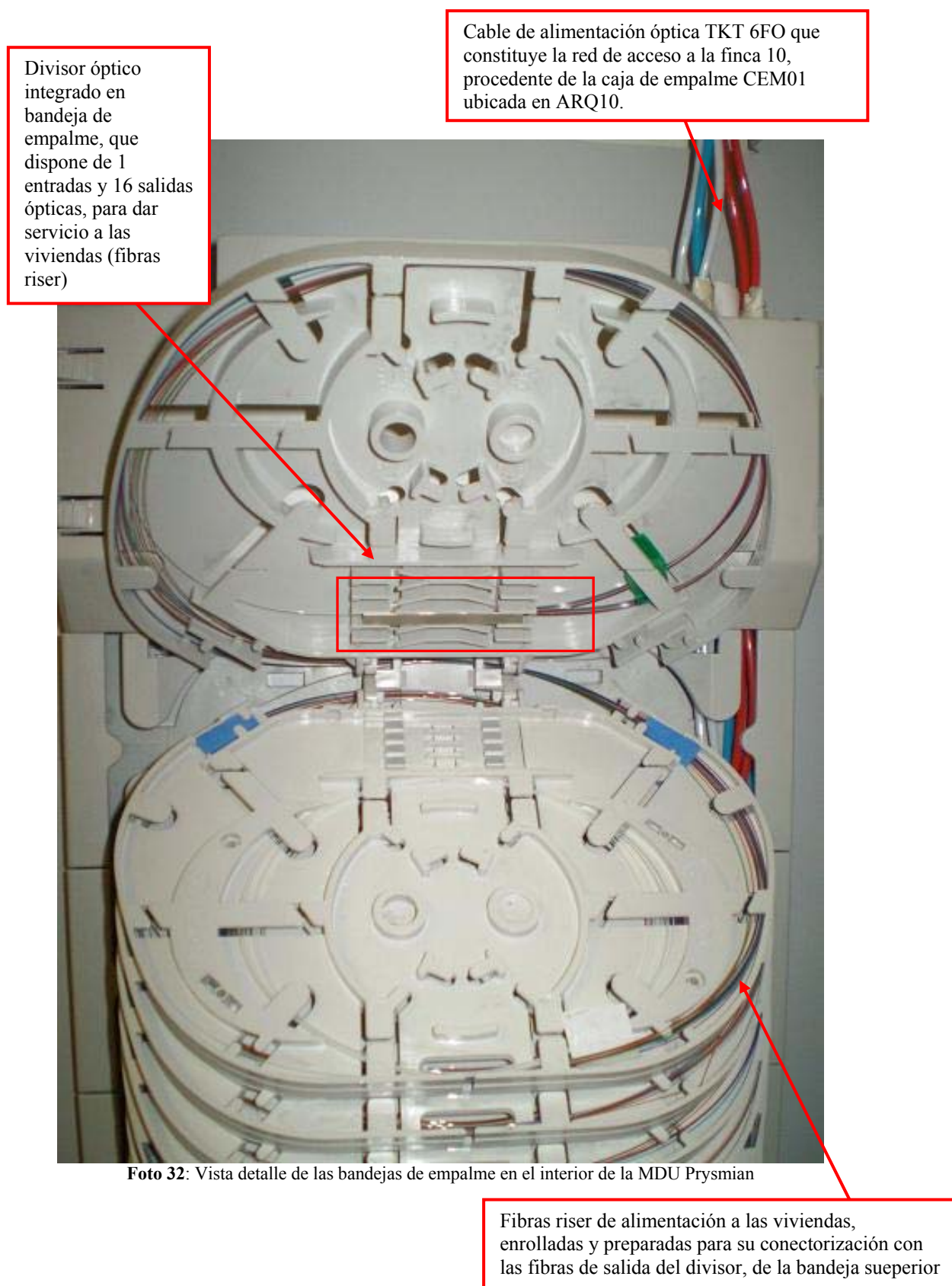


Foto 30: Vista detalle de las fibras de usuario en módulo de almacenamiento interno de la MDU Prysmian



Foto 31: Vista detalle de los tubos de fibra TKT sobrantes embridados en el interior de la MDU Prysmian



Divisor óptico integrado en bandeja de empalme, que dispone de 1 entradas y 16 salidas ópticas, para dar servicio a las viviendas (fibras riser)

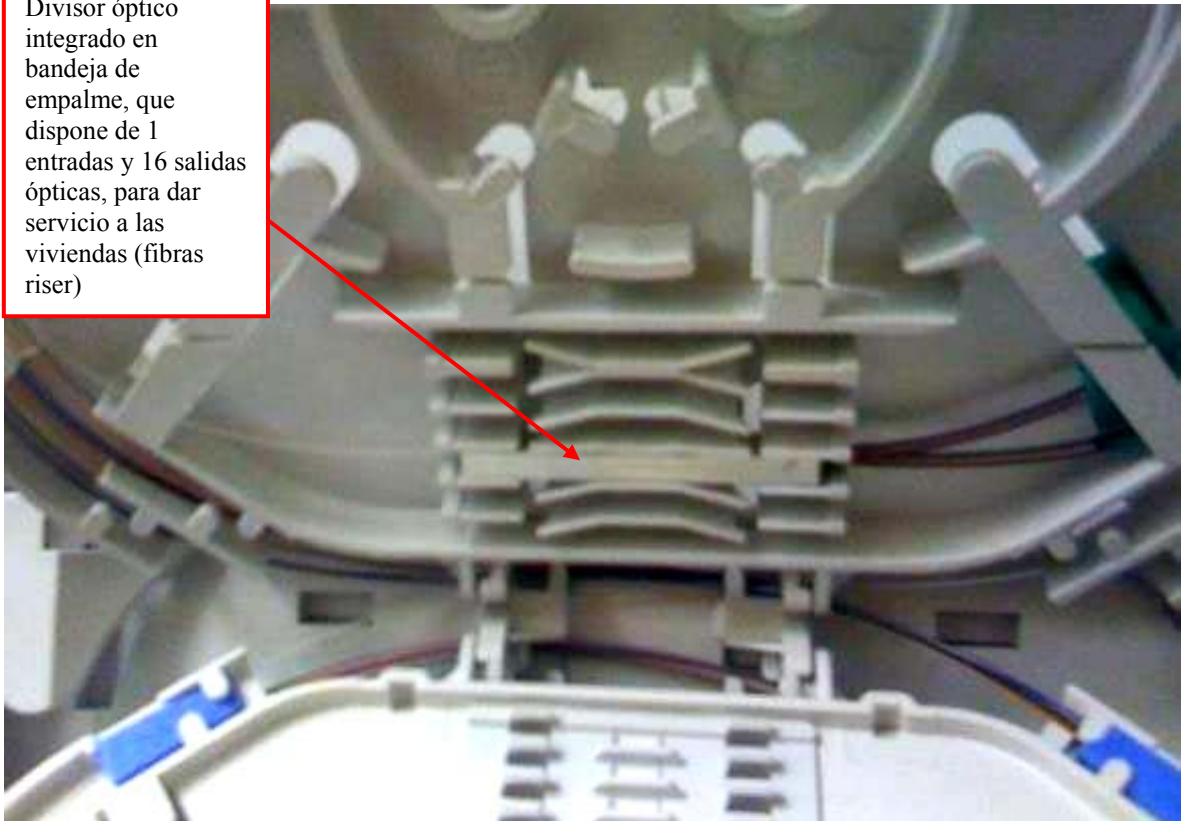
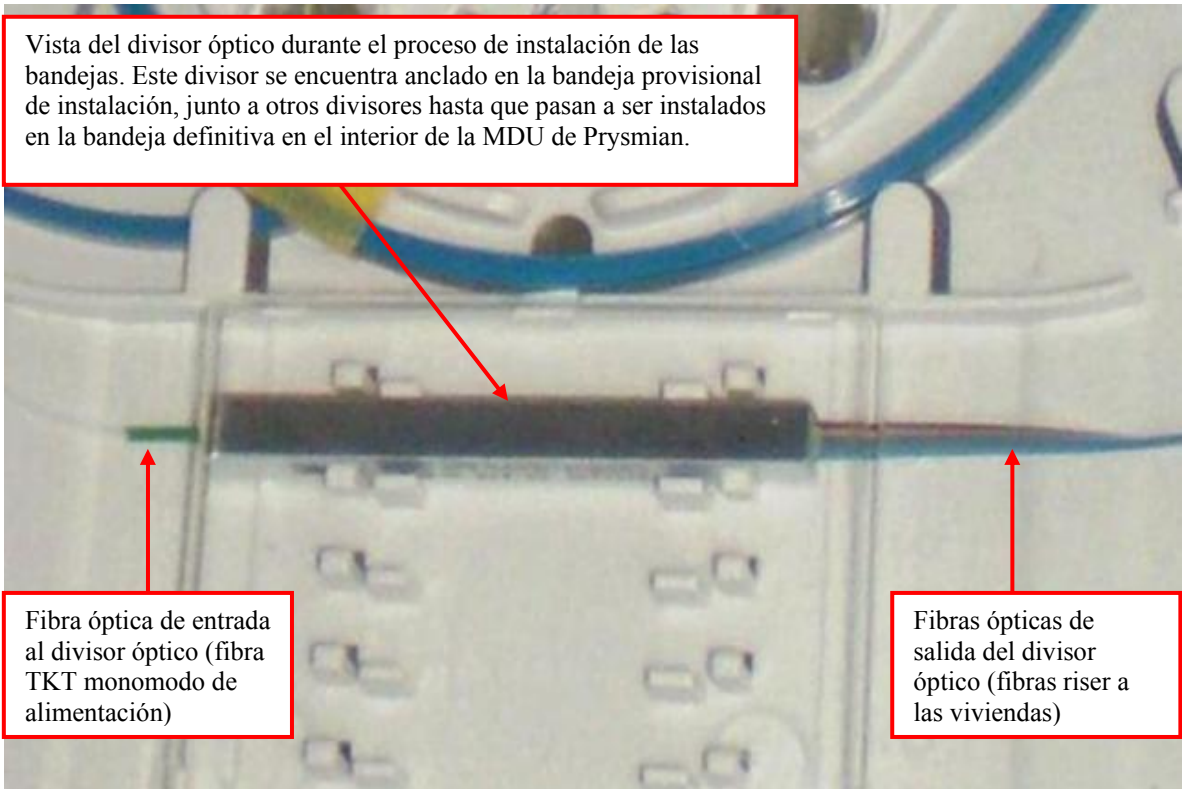


Foto 33: Vista detalle del divisor óptico en la bandeja de empalme en el interior de la MDU Prysmian

Vista del divisor óptico durante el proceso de instalación de las bandejas. Este divisor se encuentra anclado en la bandeja provisional de instalación, junto a otros divisores hasta que pasan a ser instalados en la bandeja definitiva en el interior de la MDU de Prysmian.



Fibra óptica de entrada al divisor óptico (fibra TKT monomodo de alimentación)

Fibras ópticas de salida del divisor óptico (fibras riser a las viviendas)

Foto 34: Vista detalle del divisor óptico en la bandeja de empalme en el interior de bandeja provisional de instalación



Foto 35: Vista detalle del etiquetado de los cables riser en el interior de la caja MDU Prysmian



Foto 36: Vista del cableado de acceso a través de bandejas rejiband, desde la caja MDU hasta plantas superiores



Foto 37: Vista de puerta de acceso al patinillo de canalización ICT vertical de las viviendas (planta ático)

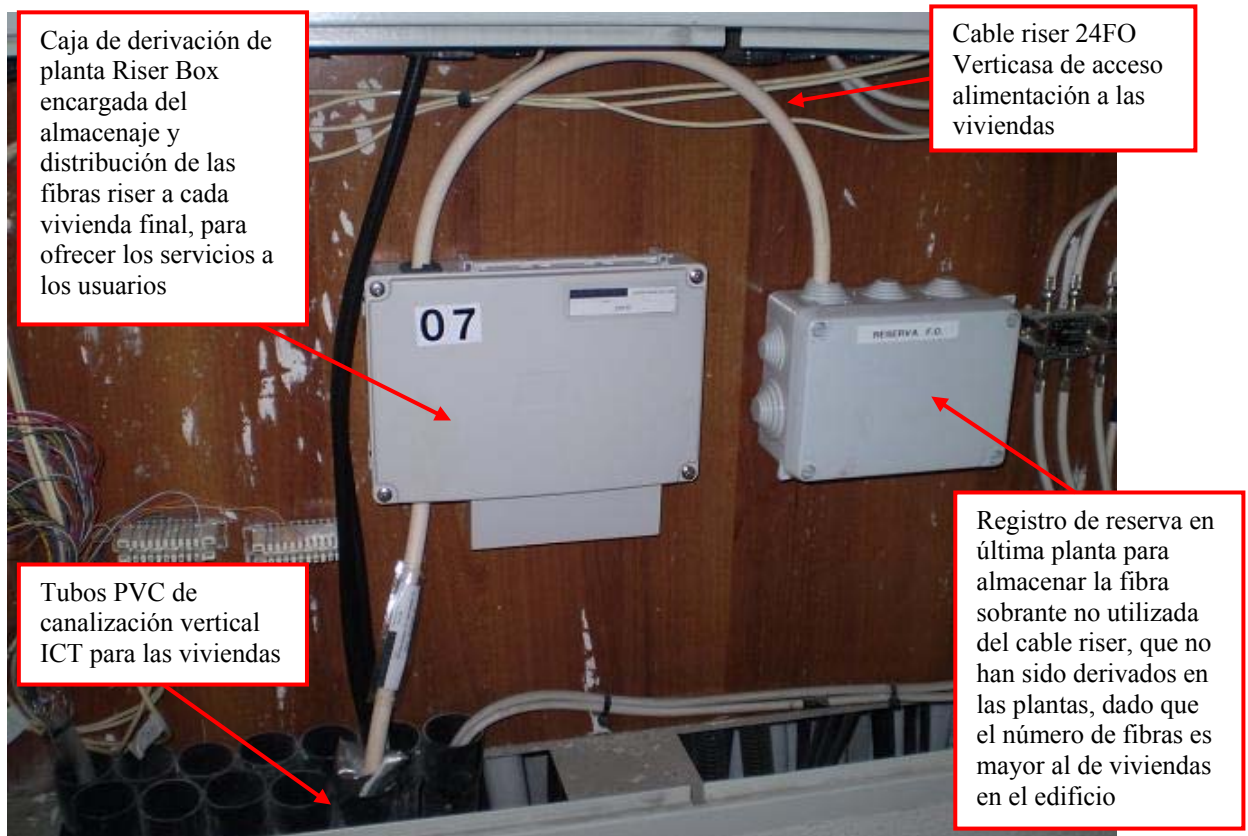


Foto 38: Vista interior del acceso al patinillo de canalización ICT vertical de las viviendas (planta ático)



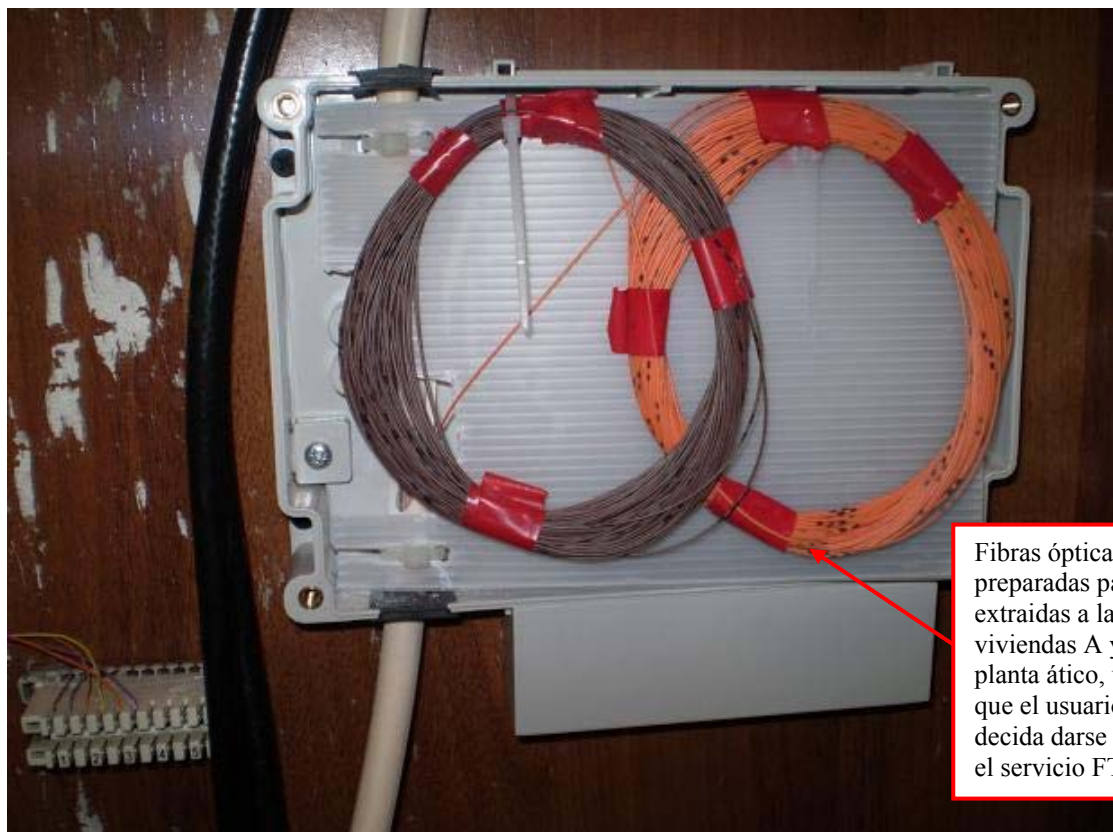
Foto 39: Vista exterior de caja de reserva de fibra óptica en cuadro de acceso en última planta



Foto 40: Vista exterior de caja de reserva de fibra óptica en cuadro de acceso en última planta



Foto 41: Vista exterior de caja Riser Box Verticasa, de derivación de la planta ático



Fibras ópticas preparadas para ser extraídas a las viviendas A y B de planta ático, una vez que el usuario final decida darse de alta en el servicio FTTH

Foto 42: Vista exterior de caja Riser Box Verticasa, de derivación de planta ático

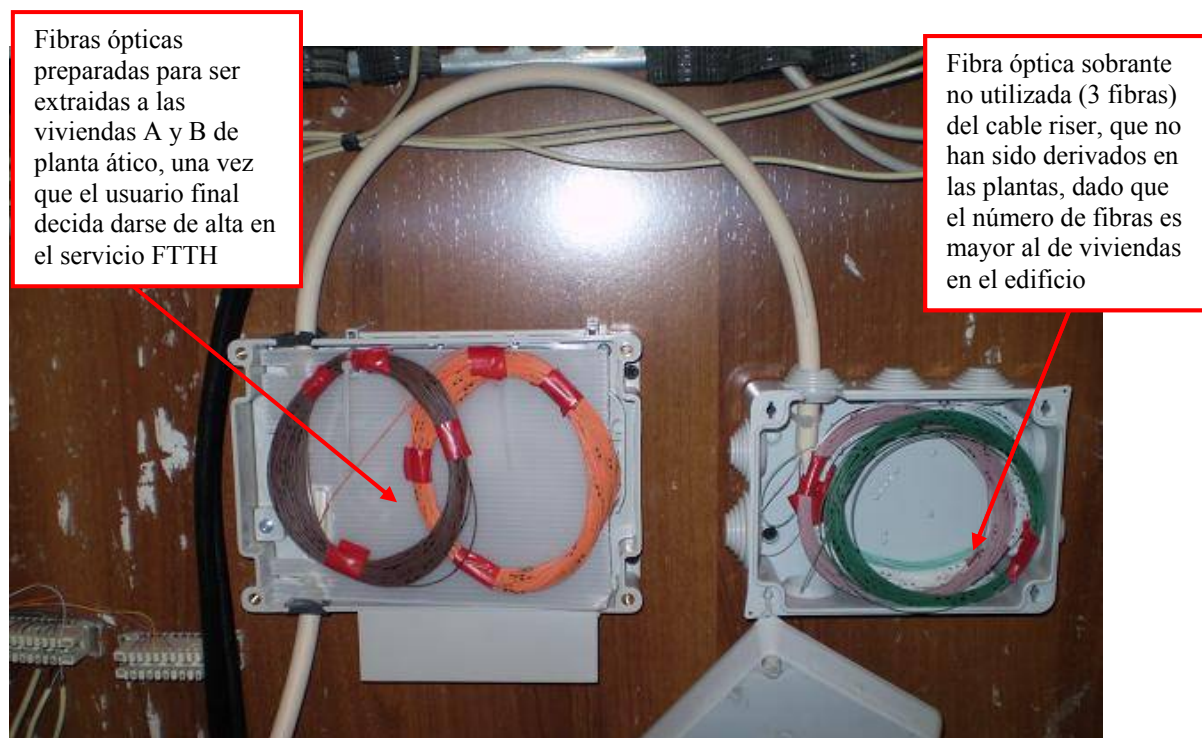


Foto 43: Vista interior del acceso al patinillo de canalización ICT vertical de las viviendas (planta ático)

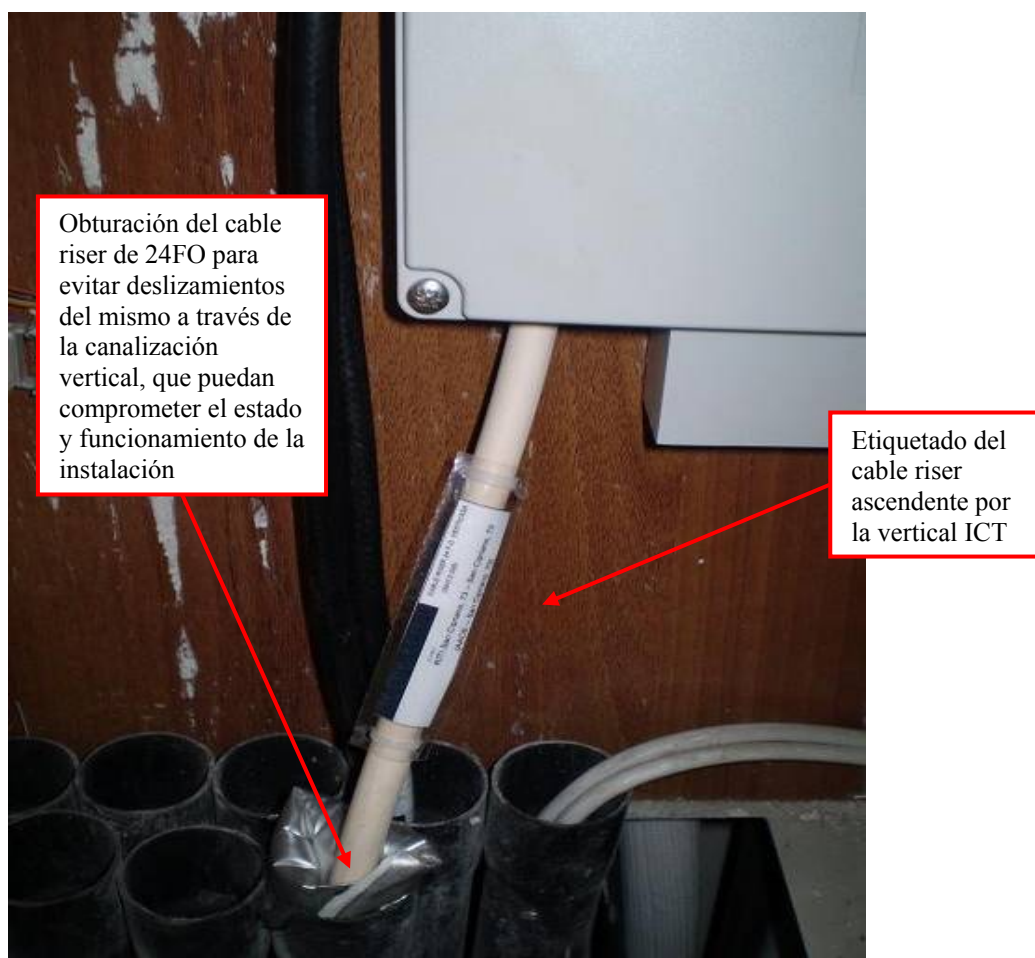


Foto 44: Vista tubos PVC de la canalización ICT del edificio para paso de cables en planta ático



Foto 45: Vista de puerta de acceso al patinillo de canalización ICT vertical de las viviendas (planta 5ª)

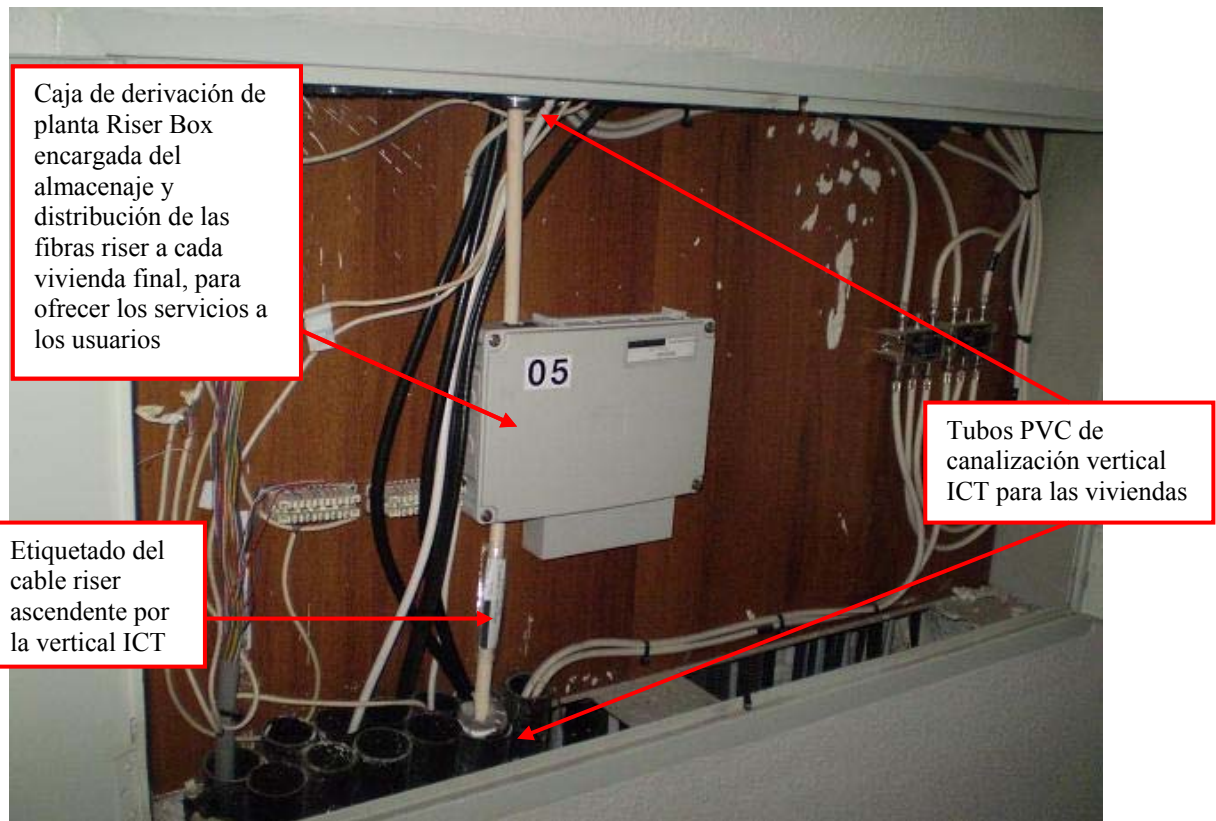


Foto 46: Vista de puerta de acceso al patinillo de canalización ICT vertical de las viviendas (planta 5ª)

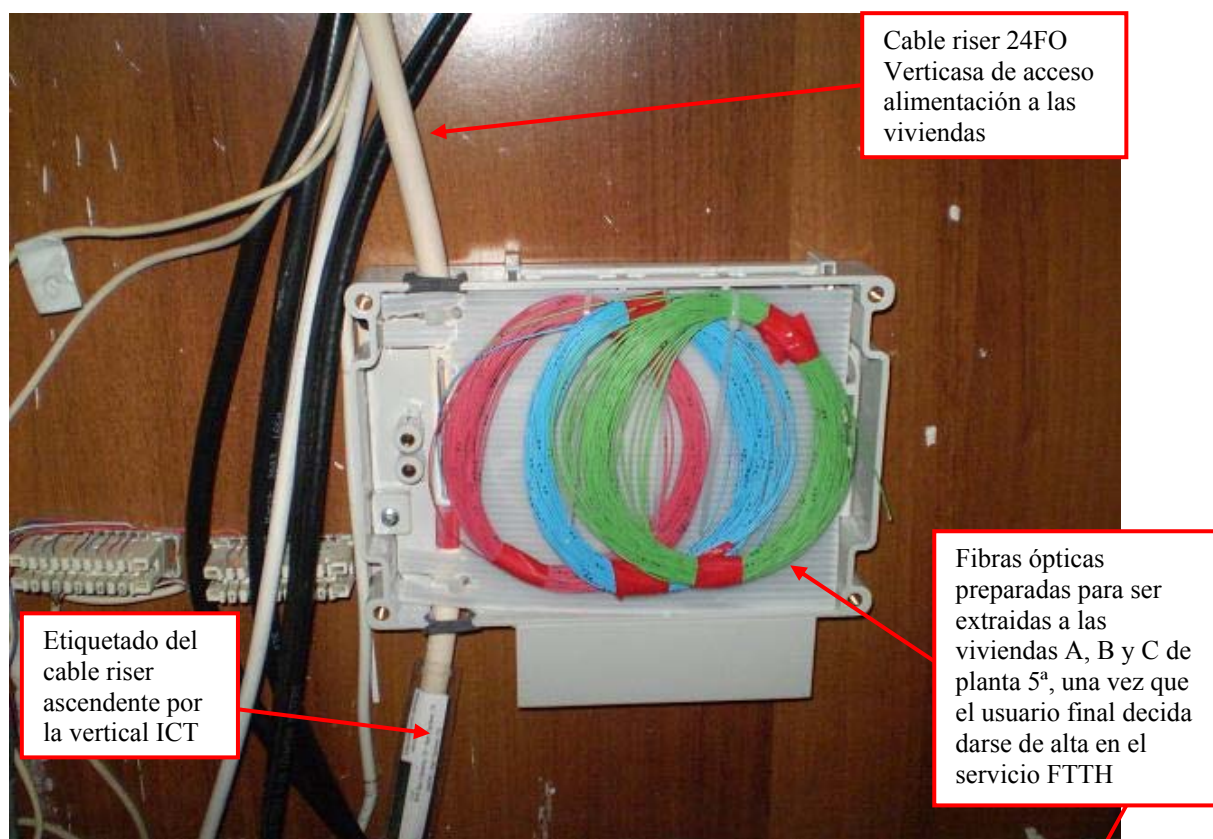


Foto 47: Vista exterior de caja Riser Box Verticasa, de derivación de planta 5ª

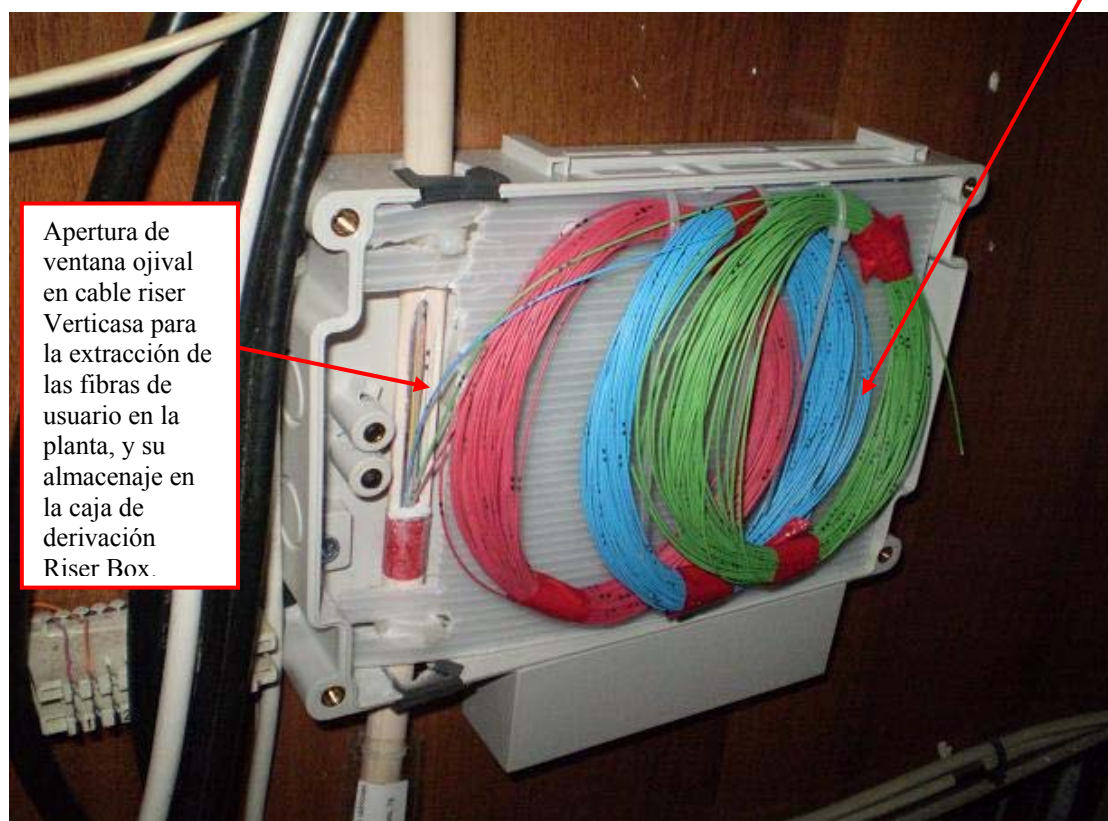


Foto 48: Vista exterior de caja Riser Box Verticasa, de derivación de planta 5ª

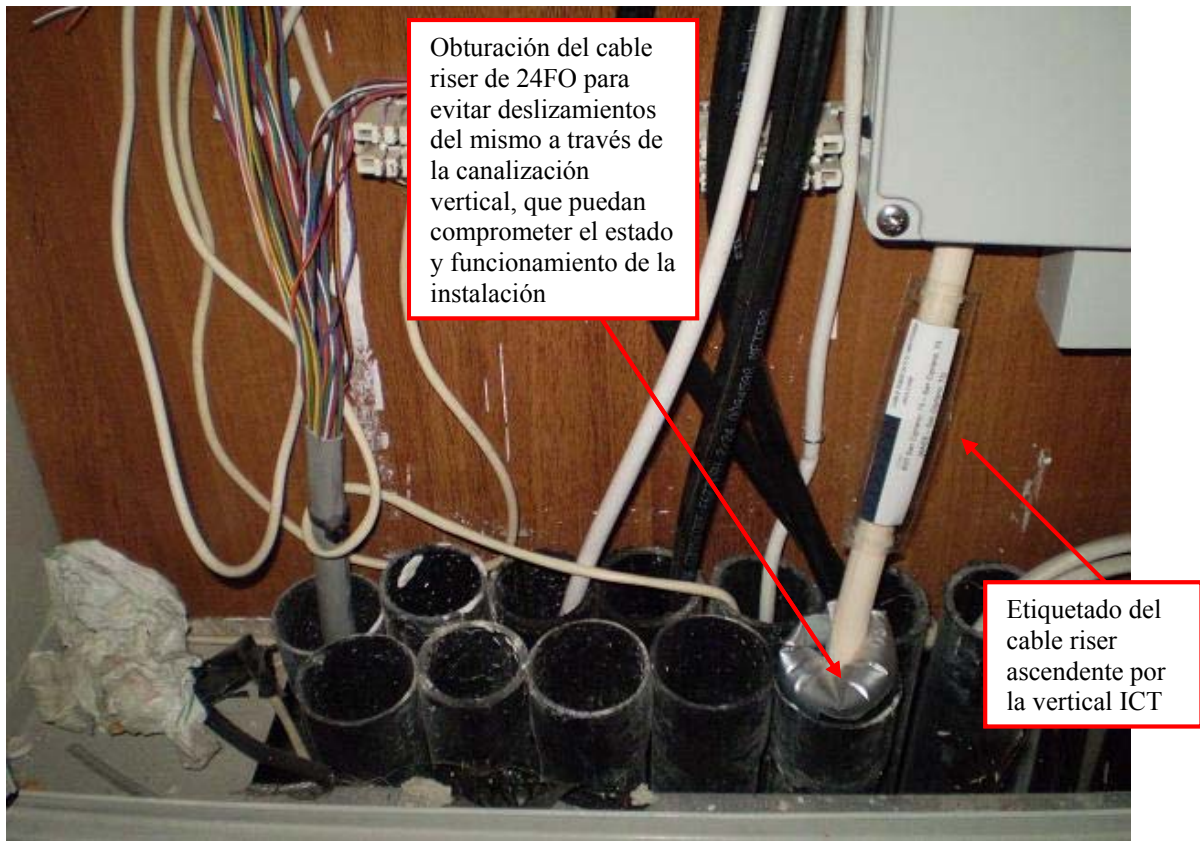


Foto 49: Vista tubos PVC de la canalización ICT del edificio para paso de cables en planta 5ª



Foto 50: Vista de puerta de acceso al patinillo de canalización ICT vertical de las viviendas (planta 1ª)

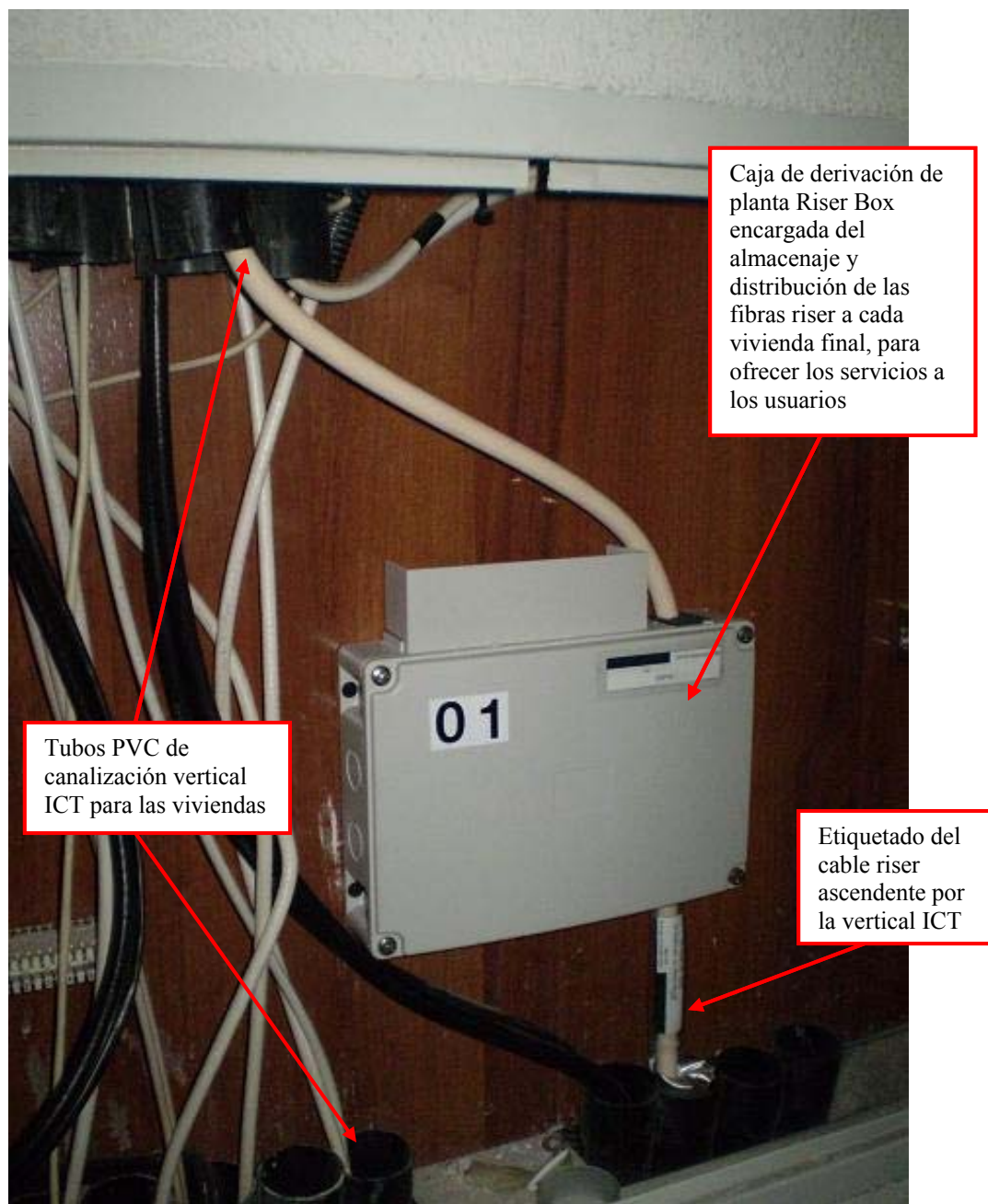


Foto 51: Vista de puerta de acceso al patinillo de canalización ICT vertical de las viviendas (planta 1ª)

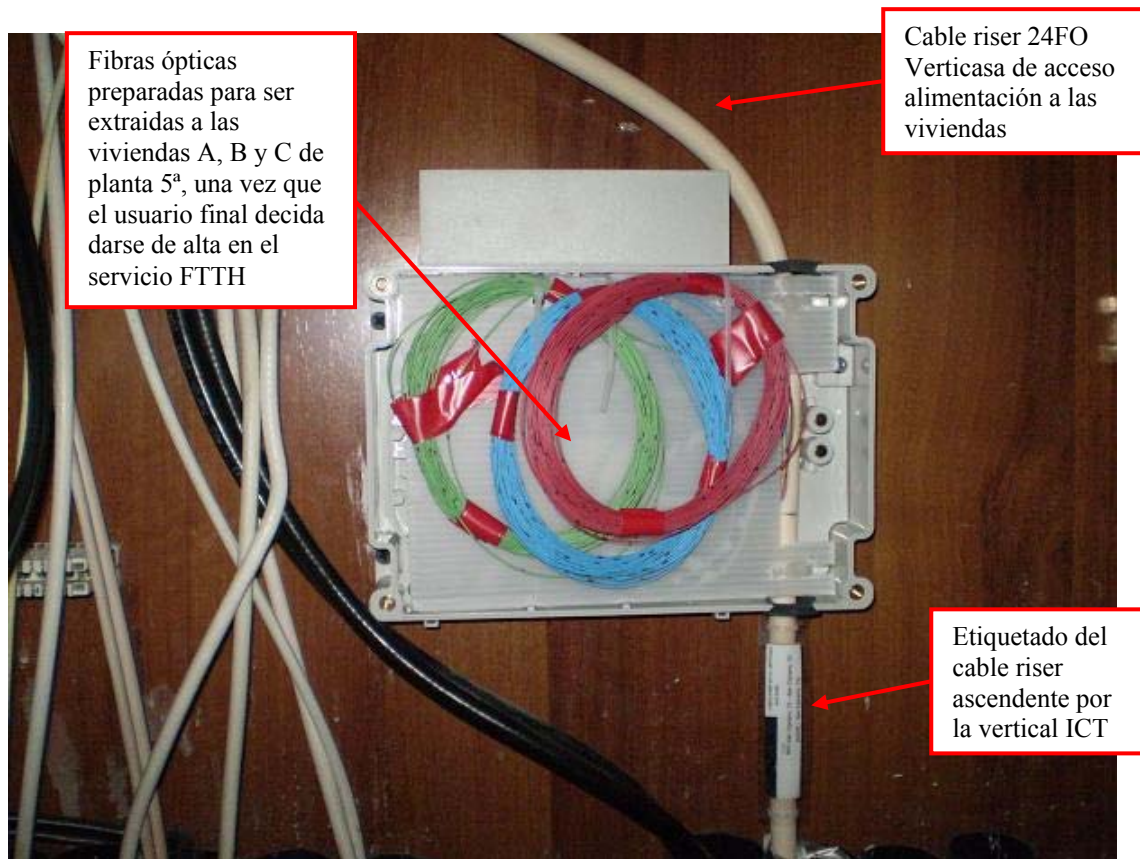


Foto 52: Vista exterior de caja Riser Box Verticasa, de derivación de planta 1ª

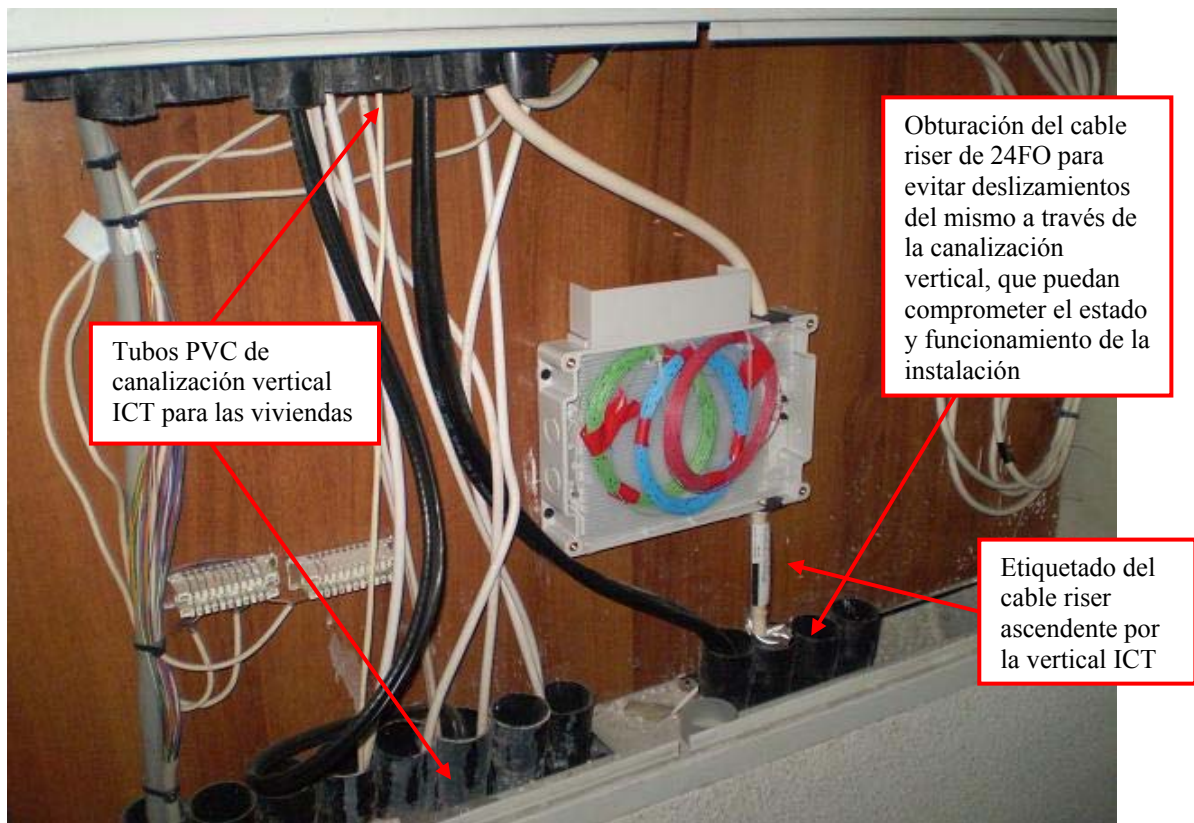


Foto 53: Vista exterior de caja Riser Box Verticasa, de derivación de planta 1ª

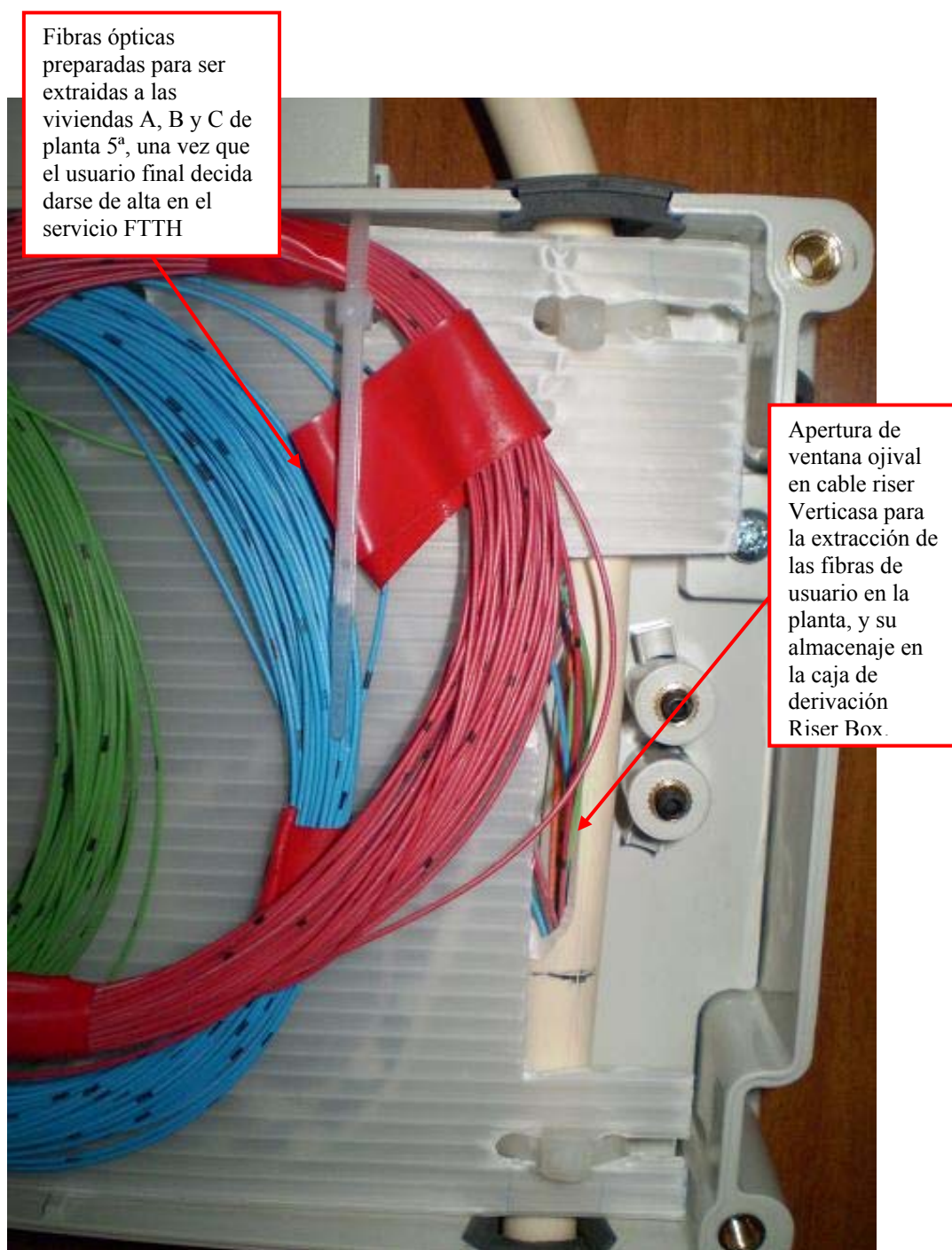


Foto 54: Vista exterior de caja Riser Box Verticasa, de derivación de planta 1ª



Foto 55: Vista de puerta de acceso al patinillo de canalización ICT vertical de las viviendas (planta 8ª)



Foto 56: Vista de puerta de acceso al patinillo de canalización ICT vertical de las viviendas (planta 8ª)

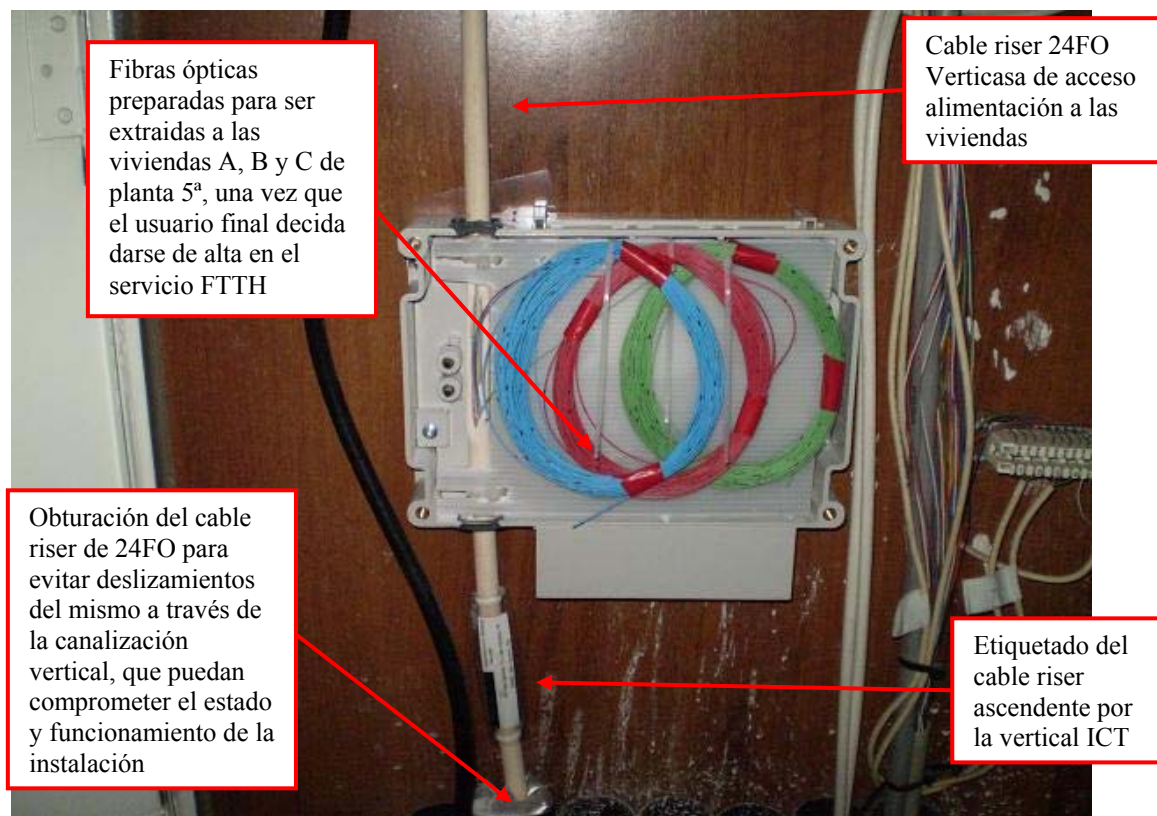


Foto 57: Vista exterior de caja Riser Box Verticasa, de derivación de planta 8ª

Glosario de términos

ADSL: línea de abonado digital asimétrica (*asymmetric digital subscriber line*).
AES: estándar de encriptación avanzado (*advance encryption standard*).
APC: pulido de contacto físico angulado (*angled physical contact*).
APD: Los fotodiodos de avalancha (*avalanche photodiodes*).
APON: red óptica pasiva ATM (*ATM passive optical network*).
ATM: modo de transmisión asíncrono (*asynchronous transfer mode*).
BER: tasa de error de bit (*bit error ratio*).
BIP: bit de paridad (*bt interleaved parity*).
BPON: red óptica pasiva de banda ancha (*broadband passive optical network*).
CLP: celda de menor prioridad (*cell loss priority*).
CPM: modulación de fase cruzada o CPM (*crossed phase modulation*).
CRC: control de redundancia cíclica.
CWDM/DWDM: multiplexación por longitud de onda corta/densa o larga (*coarse wavelength division multiplexing/dense wavelength division multiplexing*).
DD: dirección de destino (*destination address*).
DFA: amplificador de fibra dopada (*doped fiber amplifier*).
DFB: láser con realimentación distribuida o DFB (*distributed feedback*).
DGD: diferencia de dispersión de grupo (*differential group delay*).
DPD: fotodiodo digital.
DSF: fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada (*dispersion shifted fiber*).
EDFA: amplificador de fibra dopada con erbio (*erbium doped fiber amplifier*).
EPON: red óptica pasiva de Ethernet (*Ehternet passive optical network*).
FBG: dispersión de bragg de la fibra (*fiber bragg grating*).
FBT: golpeado por fusión bicónica (*fused biconical taped*).
FC: conector FC (*ferrule connector*).
FCS: secuencia de verificación de trama.
FDDI: interfaz de datos de distribución de fibra (*fiber distributed data interface*).
FEC: corrección de errores en retransmisión (*forward error correction*).
FO: fibra óptica.
FP: Fabry-Perot.
FSAN: red de acceso de servicio completo (*full service access network*).
FTTH: fibra hasta el hogar (*Fiber To The Home*).
FWM: Modulación de cuarta onda (*fourth wave modulation*).
GEM: modo de encapsulación GPON (*GPON encapsulation mode*).
GFC: Control de flujo genérico (*generic flow control*).
GFP: procedimiento de estructuración genérico (*generic framing procedure*).
GPON: red óptica pasiva gigabit.
GVD: dispersión de la velocidad de grupo (*group velocity delay*).
HDPE: polietileno de alta densidad.
HDTV: video alta definición sobre IPTV (*high definition TV*).
HEC: corrección de error de cabecera (*header error correction*).
HFC: cables híbridos de fibra y coaxial (*hibrid fiber-coaxial*).

HHT: alto voltaje de *trigger*.
ICT: instalación común de telecomunicaciones.
IEEE: Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*).
ILD: diodo de inyección laser (*injection laser diode*).
IPTV: televisión sobre IP.
ITU: Union internacional de telecomunicaciones (*Internacional Telecommunication Union*).
Laser: *Light Amplification by Stimulated Emisión of Radiation*.
LED: diodos de emisión de luz (*light-emitting diode*).
MM: multimodo.
NRZ: sin retorno a cero (*non return to zero*).
NZDSF: fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada no nula (*non zero dispersion shifted fiber*).
OAF: filtro óptico analógico (*optical analogic filter*).
ODF: filtro digital óptico (*optical digital filter*).
ODN: red de distribución óptica (*optical distribution network*).
OLED: LED orgánico (*organic LED*).
OLT: terminación óptica de línea (*optical line termination*).
OMCI: interfaz de control y mantenimiento ONT (*ONT management and control interface*).
ONT: terminación óptica de red (*optical network termination*).
OPEX: cálculo de gastos operativos.
PCBd: bloque de control físico del canal descendente (*physical control block downstream*).
PC: pulido de contacto físico (*physical contact*).
PE: polietileno
PEM: método de encapsulado PON (*PON encapsulation method*).
PIN: fotodiodo P-I-N.
PLC: circuito planar de onda ligera (*planar lightwave circuit*).
PMD: Dispersión por polarización del modo (*polarization mode delay*).
POF: fibras ópticas de plástico (*plastic optical fiber*).
PU: poliuretano.
PON: red óptica pasiva (*passive optical network*).
POTS: servicio de voz tradicional (*plain old telephone services*).
PPV: servicios de pago por visión o pago por evento (*pay per view*).
PT: tipo de información de usuario (*payload type*).
PTRO: punto terminal de red óptica.
PVC: plicloruro de vinilo.
RITI: recinto de instalación de telecomunicaciones inferior.
RTA: aplicaciones en tiempo real (*real time applications*).
SA: dirección de origen.
SAM: estructura de fotodiodo APD (*separate absorption multiplication*).
SBS: dispersión estimulada de Brillouini (*stimulate brillouini scattering*).
SC: conector (*standard connector*).
SDTV: video de definición estándar sobre IPTV (*standard definition TV*).
SIN: interfaz de red de servicios (*services network interfece*).
SM: monomodo.
SMF: fibras ópticas monomodo estándar (*standard single mode fiber*).
SOA: amplificadores ópticos de semiconductor (*semiconductor optical amplifier*).

SOF: bit más significativo del campo dirección MAC de destino.

SPM: modulación de autofase (*simple phase modulation*).

SRS: dispersión estimulada de Raman (*stimulate raman scattering*).

ST: conector ST (*straight tip*).

TDM: multiplexación por división temporal (*time division multiplexing*).

TDMA: acceso múltiple por división en el tiempo (*time division multiple access*).

TWSLA: amplificador SLA de onda viajera (*travelling wave SLA*).

UNI: interfaz de red de usuario (*user network interface*).

VCI: identificador de circuito virtual (*virtual circuit identifier*).

VoD: video bajo demanda o video a la carta (*video on demand*).

VoIP: servicio de voz IP.

VPI: identificador de ruta virtual (*virtual path identifier*).

WDM: multiplexación por división en longitud de onda (*wavelength division multiplexing*).

XGM: modulación de ganancia cruzada (*cross gain modulation*).

XPM: modulación de fase cruzada (*cross phase modulation*).

Bibliografía

- [1] Walter Goralski. “Introducción a la tecnología ADSL”. En *Tecnologías ADSL y xDSL*. McGraw Hill/Interamericana de España, Madrid, 2000.
- [2] Alberto Sendín Escalona. “Tecnologías xDSL”. En *Tecnologías de acceso para las ICTs*. Ediciones Experiencia, Barcelona, 2008.
- [3] M^a Carmen España Boquera. *Comunicaciones Ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios*, Díaz de Santos, Madrid, 1996.
- [4] Sanjay Ernest Tunmann. *Taking Hybrid fiber optics/coaxial (HFC) networks*. Artech House Publishers. 2002.
- [5] José Manuel Huidobro Moya y David Roldán Martínez. “Redes HFC y CATV”. En *Redes y servicios de banda ancha*. McGraw Hill/Interamericana de España, Madrid, 2004.
- [6] Enrique Prados. “Redes FTTH”. En *VII Jornadas Técnicas JDSU España*. Madrid, 2008.
- [7] Thomas Pfeiffer. “FTTH Solutions for providing broadband services to end-users”. En *ITG Workshop Zukunft der Netze*. Kaiserslautern, 2004.
- [8] G.Kramer, B. Mukherjee, y G. Pesavento. “Ethernet PON (EPON): Design and Analysis of a Optical Access Network”. En *Photon Network. Commun.* 3(3), 307-319, 2001.
- [9] G Kramer y G. Pesavento, “Ethernet over Passive Optical Network (EPON): Building a next-generation Access Network”. En *IEEE Communications*, vol. 4, nº 1, páginas 89-107, Enero 2002.
- [10] Jose Luis Molpeceres Criado. “Fundamentos físicos de la tecnología láser”. En *Conferencia sobre láser y sus aplicaciones digitales*. Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía. Madrid, 30 de noviembre al 1 de diciembre de 1998.
- [11] Internacional Telecommunication Union. “Requisitos de la red óptica”. En *Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas (PON)*. Recomendación UIT-T G.983.1 (01/2005).
- [12] Internacional Telecommunication Union. *Especificación de la interfaz de control y gestión de terminales de red óptica para redes ópticas pasivas de banda ancha (BPON)*. Recomendación UIT-T G.983.2 (07/2005).

- [13] Internacional Telecommunication Union. *Sistema de acceso óptico de banda ancha con capacidad de servicio incrementada mediante la asignación de longitudes de onda*. Recomendación UIT-T G.983.3 (06/2005).
- [14] Internacional Telecommunication Union. *Características de los cables y fibras ópticas monomodo*. Recomendación UIT-T G.653 (06/2005).
- [15] The Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Ethernet in the First Mile Task Force*. Recomendación IEEE 802.3ah (06/2004).
- [16] Internacional Telecommunication Union. *Redes ópticas pasivas de capacidad Gigabit (GPON): características generales*. Recomendación UIT-T G.984.1 (03/2008).
- [17] Internacional Telecommunication Union. *Redes ópticas pasivas de capacidad Gigabit (GPON): especificación de la capa dependiente de los medios físicos*. Recomendación UIT-T G.984.2 (03/2008).
- [18] Internacional Telecommunication Union. *Redes ópticas pasivas de capacidad Gigabit (GPON): especificación de la capa de convergencia de transmisión*. Recomendación UIT-T G.984.3 (03/2008).
- [19] Internacional Telecommunication Union. *Redes ópticas pasivas de capacidad Gigabit (GPON): especificación de la interfaz de control y gestión de la terminación de red óptica*. Recomendación UIT-T G.984.4 (02/2008).
- [20] Internacional Telecommunication Union. *Características de las fibras y cables ópticos monomodo*. Recomendación UIT-T G.652 (06/2005).
- [21] Francisco Javier Luque. "Innovation in network technologies". En *Taking you forward conference of Ericsson*. Madrid, 2007.
- [22] Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones. "Redes FTTH". En *Principios y líneas maestras de la Futura Regulación de las Redes de Acceso de Nueva Generación NGA*. Normativa MTZ 2007/358. Barcelona, 2007.
- [23] Equipo de Telecommunity. "Redes de fibra hasta el hogar: una realidad". En *Revista Telecommunity* 1, nº 75, Madrid, 2008.
- [24] Gloria Moreno. "Telefónica invertirá un 25% en tecnología FTTH". En *Lider Digital*. World Wide Web: www.liderdigital.com, Madrid, 2008.
- [25] José Martín Sanz. *Comunicaciones Ópticas*, Paraninfo, Madrid, 1996.
- [26] Baltasar Rubio Martínez. "Historia y evolución de la fibra óptica". En *Introducción a la ingeniería de fibra la óptica*. Addison-Wesley Iberoamericana, Buenos Aires, 1994.

- [27] Edward L Safford y José Manuel Nobre García. *Introducción a la fibra óptica y el láser*, Paraninfo, Madrid, 1994.
- [28] Wayne Tomasi. “Comunicaciones de fibra óptica”. En *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Prentice Hall, Madrid, 2003.
- [29] K.C.Kao y G.A.Hockham Artículo “Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies” En *Proceedings IEE* 113 pp 1151-1158, Julio de 1966.
- [30] Antonio Rodríguez Suárez. *Comunicaciones Ópticas*, Bellisco, 2ª ed. Madrid, 2005.
- [31] M. S. Millán, J. Escofet. *Óptica geométrica*, Ariel, Barcelona, 2004.
- [32] P. M. Mejías; R. Martínez Herrero. *Óptica geométrica*, Ed. Síntesis, Madrid, 1999.
- [33] Christiaan Huygens. *Traité de la Lumière*. Hardcover, 1690.
- [34] W. Fendt y J. Muñoz. “Índices de refracción de ciertos materiales”. En *Fenómenos físicos de la luz*. Artículo de la Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
- [35] Systimax Solutions. *Design and Engineering of optical fiber systems*. CommScope, Somerset (England), 2007.
- [36] Jeff Hecht. *Understanding fiber optics*, Prentice Hall, 4ª ed, 2002.
- [37] Jose Luis Molpeceres Criado. “Fundamentos físicos de la tecnología láser”. En *Conferencia sobre láser y sus aplicaciones digitales*. Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía. Madrid, 30 de noviembre al 1 de diciembre de 1998.
- [38] José Campany. *Dispositivos de comunicaciones ópticas*. Síntesis, Madrid, 1999.
- [39] Carlos Janer. *Dispositivos para comunicaciones ópticas*. Dinel, 2009.
- [40] Imagen O348. “Cables de distribución óptica”. En *Fibra óptica hoy*. Disponible en World Wide Web: <http://www.fibraopticahoy.com>, 2009.
- [41] Telecommunications Industry Association, Electronic Industry Alliance. *Optical Fiber Cabling Components*. Estandar TIA/EIA-598-A (04/2000).
- [42] J. Demorris. “Splitters in FTTH”. En *Weekly News FTTx*, Marzo, 2008.
- [43] Imagen Divisores. *OFP3*. Disponible en World Wide Web: www.ofp3.com, 2009.

- [44] ADC Krone Soluciones ópticas. *Guía de conectores y elementos de panelado óptico*. ADC Krone en World Wide Web: www.adckrone.com, 2008.
- [45] Comisión Sueca de Tecnología de la Información. “Report 37/2001”. En *FTTH estructure*. Estocolmo, 2001.
- [46] S. Nilsson-Gistvik, P. Lo Curzio y H. Serrander. “A guide-line on how to build fiber optic access networks –FTTX networks”. En *Fibre optic access to End-Users*. BSI, 2007.
- [47] The Institute of Electrical and Electronics Engineers. *1000Base-LX*. Recomendación IEEE 802.3 (06/2004).
- [48] The Institute of Electrical and Electronics Engineers. *10Gbase-LX*. Recomendación IEEE 802.3 (06/2004).
- [49] Grupo Neva. “Instalación ICT telecomunicaciones”. Imagen disponible en Wordl Wide Web: www.gruponeva.es. 2007.
- [50] Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones. *Procedimiento para la definición y análisis del mercado de acceso al por mayor a infraestructura de red*. Normativa ISCMTE-091856-1IL Isdefe 2009/02, Barcelona, 2009.
- [51] Jesús Galeano. *Acta de Replanteo del proyecto FTTH*. Madrid, 2008.
- [52] A. Carmona y S. Villanueva. *Estudio sociocultural estadístico sobre el sistema FTTH en las Fincas A7, A8, A9 y A10 de Vicálvaro*. Random, Madrid, 2008.
- [53] Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones. *Procedimiento para la definición y análisis del mercado de acceso al por mayor a infraestructura de red*. Normativa MTZ 2008/626. Barcelona, 2008.
- [54] Internacional Telecommunication Union. *Redes ópticas pasivas de capacidad Gigabit (GPON): características generales*. Recomendación UIT-T G.984.1 (03/2008).
- [55] DRAKA Cables y sistemas. *Guía de referencia de elementos ópticos pasivos, cables y fibras ópticas*. Disponible en World Wide Web: www.draka.com, 2008.
- [56] OPTRAL Cables ópticos. *Referencia de materiales pasivos*. Disponible en World Wide Web: www.optral.com, 2008.
- [57] Telecommunication Industries Association. *Specifications for optical waveguide fibers: TIA/EIA-492 STANDARDS*, 2000.
- [58] Internacional Telecommunication Union. *Características de un cable de fibra óptica multimodo de índice gradual de 50/125 mm*. Recomendación UIT-T G.651 (02/1998).

- [59] Internacional Telecommunication Union. *Características de las fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada*. Recomendación UIT-T G.653 (12/2003).
- [60] Internacional Telecommunication Union. *Características de las fibras y cables ópticos monomodo de pérdida minimizada*. Recomendación UIT-T G.654 (06/2004).
- [61] Internacional Telecommunication Union. *Características de las fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula*. Recomendación UIT-T G.655 (03/2006).
- [62] Internacional Telecommunication Union. *Características de las fibras y cables ópticos monomodo con dispersión no nula para transporte óptico de banda ancha*. Recomendación UIT-T G.656 (12/2006).
- [63] Internacional Telecommunication Union. *Características de las fibras y cables ópticos monomodo insensibles a la pérdida por flexión para la red de acceso*. Recomendación UIT-T G.657 (12/2006).
- [64] International Electrotechnical Commission. *Product specifications – Sectional specification for class B singlemode fibres*. Estándar IEC 60793-2-50 (05/2008).
- [65] International Organization for Standardization. *Information technology — Generic cabling for customer premises*. Estándar ISO/IEC 11801 (03/2006).
- [66] International Organization for Standardization. *Information technology — Generic cabling for industrial premises*. Estándar ISO/IEC 24702 (03/2006).
- [67] Ciencia al Día. “Diodos LED”. Imagen disponible en World Wide Web: www.cienciaaldia.files.wordpress.com. 2007.
- [68] Ringofsaturn. “MT-Array”. En *Networking*. Imagen disponible en World Wide Web: www.networking.ringofsaturn.com . 2008.

